



GRAU EN ÒPTICA I OPTOMETRIA

TREBALL FINAL DE GRAU

Anàlisi i comparació d'aplicacions (*apps*) per al control de la llum blava dels dispositius electrònics.

Josué Garcia Moreno

DIRECTORA: Elisabet Pérez Cabré
DIRECTOR: Jaume Escofet Soteras
DEPARTAMENT: Òptica i Optometria

01 de juny de 2016



GRAU EN ÒPTICA I OPTOMETRIA

Els Srs. Elisabet Pérez Cabré i Jaume Escofet Soteras, com a tutors i directors del treball,

CERTIFIQUEN

Que el Sr. Josué Garcia Moreno ha realitzat sota la seva supervisió el treball "Anàlisi i comparació d'aplicacions (*apps*) per al control de la llum blava dels dispositius electrònics" que es recull en aquesta memòria per optar al títol de grau en Òptica i Optometria.

I per a què consti, signem aquest certificat.

Sra Elisabet Pérez Cabré
Directora del TFG

Sr Jaume Escofet Soteras
Director del TFG

Terrassa, 17 de maig de 2016



GRAU EN ÒPTICA I OPTOMETRIA

Anàlisi i comparació d'aplicacions (*apps*) per al control de la llum blava dels dispositius electrònics.

RESUM

En la nostra societat actual, l'ús de dispositius electrònics com els mòbils, tauletes, ordinadors o televisors, tots ells amb pantalles on es visualitzen les dades, ocupa moltes hores del temps laboral i d'oci de bona part de les persones. A més, l'obtenció recent de llum blanca amb tecnologia LED ha permès la fabricació de pantalles retro-il·luminades amb aquestes fonts de llum, obtenint pantalles amb millors rendiments energètics, contrastos més alts i gamma de colors més extenses. Tot i aquests avantatges les pantalles LED emeten un pic de radiació en la franja blava de l'espectre del visible que pot ser perjudicial per a la salut humana.

Estudis recents han investigat sobre la interacció que existeix entre l'exposició a la llum blava (400 – 500 nm) i els ritmes circadians (cicles de 24 hores de vigília i son), provocant alteracions d'aquest ritme biològic quan hi ha exposicions prolongades de llum blava durant la nit. Això ha fet veure la necessitat d'usar filtres addicionals a les pantalles que permetin reduir l'exposició del sistema visual a les radiacions de longitud d'ona curta. Actualment existeixen dos tipus de filtres, els filtres hardware com les làmines absorbents que es disposen damunt de pantalles o de lents oftàlmiques i els filtres per software consistents en aplicacions que s'instal·len en els dispositius electrònics per controlar l'espectre d'emissió de llum de la seva pantalla.

En aquest treball ens proposem conèixer les aplicacions disponibles per a diversos dispositius electrònics i mesurar l'atenuació que produeixen sobre la llum blava que emeten. Es comparen els espectres d'emissió de les pantalles per a diferents filtres i es mesura l'impacte circadià de la llum que arriba a l'ull.



GRAU EN ÒPTICA I OPTOMETRIA

Análisis y comparación de aplicaciones (*apps*) para el control de la luz azul de los dispositivos electrónicos.

RESUMEN

En nuestra sociedad actual, el uso de dispositivos electrónicos como los móviles, tabletas, ordenadores o televisores, todos ellos con pantallas donde se visualizan los datos, ocupa muchas horas del tiempo laboral y de ocio de buena parte de las personas. Además, la obtención reciente de luz blanca con tecnología LED ha permitido la fabricación de pantallas retro-iluminadas con estas fuentes de luz, obteniendo pantallas con mejores rendimientos energéticos, contrastes más altos y gama de colores más extensas. Sin embargo, las pantallas LED emiten un pico de radiación en la franja azul del espectro del visible que puede ser perjudicial para la salud humana.

Estudios recientes han investigado sobre la interacción que existe entre la exposición a la luz azul (400-500 nm) y los ritmos circadianos (ciclos de 24 horas de vigilia y sueño), provocando alteraciones de este ritmo biológico cuando hay exposiciones prolongadas de luz azul durante la noche. Esto ha puesto de manifiesto la necesidad de usar filtros adicionales en las pantallas que permitan reducir la exposición del sistema visual a las radiaciones de longitud de onda corta. Actualmente existen dos tipos de filtros, los filtros hardware como las láminas absorbentes que se depositan encima de pantallas o de lentes oftálmicas y los filtros por software consistentes en aplicaciones que se instalan en los dispositivos electrónicos para controlar el espectro de emisión de luz de su pantalla.

En este trabajo nos proponemos conocer las aplicaciones disponibles para varios dispositivos electrónicos y medir la atenuación que producen sobre la luz azul que emiten. Se comparan los espectros de emisión de las pantallas para diferentes filtros y se mide el impacto circadiano de la luz que llega al ojo.



GRAU EN ÒPTICA I OPTOMETRIA

Analysis and comparison of applications (*apps*) for the control of the blue light in electronic devices.

ABSTRACT

Nowadays, electronic devices with visual display screens such as mobile phones, tablets, computers or televisions play an important roll in working and leisure time of the majority of people. Moreover, the invention of white light through LED technology has enabled the implementation of LED-backlit displays, which provide higher contrast, a larger colour range and better energy efficiency. Despite these advantages, LED screens emit a radiation peak in the blue band of the visible spectrum that might be harmful to human health.

Recent studies have investigated the interaction between exposure to blue light (400 – 500 nm) and circadian rhythms (cycles of 24 hours of wakefulness and sleep) demonstrating an alteration of this biological cycle when there is a prolonged blue-light exposure at night. Consequently, additional screen filters have become necessary in order to reduce the exposure of our visual system to short wavelength radiation. Currently there are two types of filters, hardware filters, which consist in absorbent sheets that are placed on screens or ophthalmic lenses, and software filters, comprising all the applications that can be installed in electronic devices to control the light emission spectrum of their screens.

This project is focused on the investigation of the present applications for some electronic devices and the measurement of their attenuation of the emitted blue light. Furthermore, emission spectra of different screen filters are compared, measuring also the circadian impact of the light that reaches the eye.

SUMMARY

1. Introduction

The use of electronic devices with visual display screens, either for work or for leisure activities, increases every day. Mobile phones, tablets, desktops or laptops, televisions, GPS are some examples of these devices. Most of the screens of these devices are made of backlit liquid crystal displays, also called LCDs. The fast development of LED technology has allowed more efficient illuminations, better contrasts and a wide range of colours in a lot of the current digital screens. But this new technology does not have only advantages. Light emitted by these screens has a rich spectrum in the blue band (**figure 1**) that can affect human health by altering the circadian rhythms.

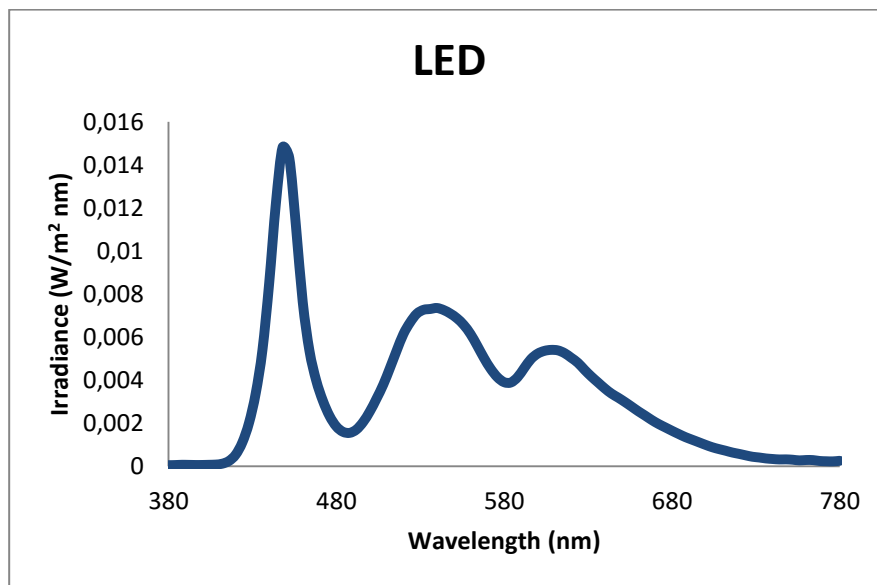


Figure 1. Emission spectrum of the white LED.

Days on Earth are organized in 24 hours with a normal duration of approximately 12 hours of daylight and 12 hours of darkness at the equator, with varying latitude and seasons throughout the year. Most living organisms, specifically humans, are adapted to this cycle thanks to endogenous biological clocks (internally programmed by the body), which are the ones responsible of coordinating biological rhythms. These rhythms are mainly generated by the circadian pacemaker. The main one is located in the brain, concretely in the suprachiasmatic nucleus (SCN) of the hypothalamus. SCN clock is synchronized with the light so the circadian period is composed of 24 hours. The circadian rhythm is principally regulated by the hormone melatonin. Melatonin also known as the sleep hormone is synthesized at night, whereas the production is practically non-existent during the day. It is believed that the main function of melatonin is to provide an internal biological signal for the duration of the night, and a signal from dawn to dusk. It has been shown that exposure to blue light at night exerts an effect of suppressing melatonin.

In order to protect the visual system of radiation, the eye has its own internal filters. Almost all of the UV light that reaches the eye is absorbed by the cornea and lens. Moreover, they (the lens in a minor range) also block a big part of the IR light above 980nm. Thanks to that, the retina is exposed almost exclusively to the visible portion of the electromagnetic spectrum. In the case of blue light, filters that protect the internal visual system in front of these wavelengths are the lens and macular pigment.

The alert generated these last years about the harmful effects of blue light at night has led to the development of different types of filters external to the eye. These filters can be classified in two types: software filters and hardware filters. Software filters, which are installed on the device acting as internal elements, are the most accessible since everyone can have them in some of their electronic devices, and are often free of cost. Hardware filters act as external device elements and are presented in two ways: as sheets of selective absorbance and as filters for ophthalmic lenses.

In this project irradiance spectra of different screens, like mobile devices, tablets and laptops, has been measured. Additionally, the attenuation effect on the emission spectrum has been measured for blue filters, both for software and hardware. Finally, circadian impact of the light that reaches the eye has also been calculated through bright parameters.

2. Materials and methods

Diverse LED-backlit displays with different filters and operating systems were used to perform the measurements.

In the case of software filters, **table 1** shows the models for each device, the operating systems used and applications (apps) analysed.

Table 1. Devices, operating systems and apps analysed for software filters.

Device	Operating system	Apps
Tablet <i>Acer Inconia One 7</i>	<i>Android</i>	<i>Twilight, Filtro luz azul i Blue Light Eyecare</i>
Smartphone <i>Iphone 5s</i>	<i>IOS</i>	<i>Nigth Shift</i>
PC <i>Asus F555L</i>	<i>Windows</i>	<i>f.lux</i>

For hardware filters, the device, the operating system and the type of filter are presented in **table 2**.

Table 2. Devices, operating systems and hardware filters analysed.

Device	Operating system	Filters
PC Asus F555L	Windows	<i>Reticare:</i> filter intense filter high filter medium
		Ophthalmic lens: <i>Essilor (model Crizal Prevencia)</i> <i>Hoya (model Blue Control)</i> <i>Prats (model CSR)</i>

So as to perform radiometric measurements it was necessary to use a spectroradiometer model PR-715 from "Photo Research". In every measure it has been assumed a distance of 40cm between the sensor and the screen. This distance is considered a normal value when looking at electronic devices, but it can be shorter in the case of mobile phones due to their smaller screen. The control of the spectroradiometer was made through the program SpectraWin, which has allowed us to obtain and record the measurements taken by the device for their further analysis. The spectroradiometer provides spectral measurements between the wavelengths of 380nm and 1068nm, with a 4nm step. For this study the measures were restricted from 380 to 780nm of the visible range in order to analyse the blue filters' effect in this region of the spectrum.

For equal measuring conditions, light, obtained from a white uniform image displayed on the device screen with brightness at maximum intensity, was sent to the spectroradiometer. Each application analysed had control parameters, usually different from each other. In all cases, the values found without blue filter or with the application disabled and the values corresponding to maximum attenuation were investigated.

Five different functions that act on the irradiance spectrum of the light falling on the cornea have been proposed to describe the impact of this light on the circadian system. These functions correspond to each of the opsin excited when the light is received and correspond to the five following receptors: R (Rode opsin), M (Melanopsin), SC (Short cone opsin), MC (Medium opsine cone) and LC (Long opsine cone). The danger threshold for the circadian system was set on 20Mel-lux, meaning a 6% inhibition of melatonin production if the action lasts an hour.

3. Results and discussion

As an example, the effect of two filters (one software and one hardware) is presented in this summary. This study shows the results of *f.lux* application installed on the laptop in the case of software filters, and includes the results of different Reticare filters (intense, high, medium) for

hardware filters. The results of the application of other filters are exposed in the memory of this project.

F.lux filters

Figure 2 shows the curve of spectral irradiance for the screen without filters and with filters corresponding to colour temperatures of 5000K, 4100K, 3400K and 2700K.

In the first place it is essential to analyse the general shape of the spectrum measured without applying the filter. This spectrum obtained is characteristic of the emission LED RGB lighting system with three prominent peaks in the band of blues, greens and red, respectively. As mentioned above, the high irradiance in the short wavelength region is the responsible for the alteration of circadian rhythm when the visual system is exposed to this radiation at night.

There is a considerable attenuation of the spectrum bands in all cases, mainly in the blue and green band, under the action of the filters, causing the effect of a warmer tone. Visually, the decrease in the intensity of the spectrum in the blue and green region has as a result images with a reddish tonality.

Figure 3 shows the circadian responses from the photoreceptors under the effect of these filters. In the last column of the chart, the measures for total screen illumination can also be observed. 6500K, 5000K and 4100K filters exhibit response values higher to 20 Mel-lux in the melanopic output, which makes them potentially dangerous for a prolonged use of the laptop. 3400K and 2700K filters are the most suitable for the use of this device at night. A consequence of their use is a change of colour to red of the images displayed. The maximum screen brightness of this laptop is 35 lux, but this value is reduced to 19 lux with the 2700K filter.

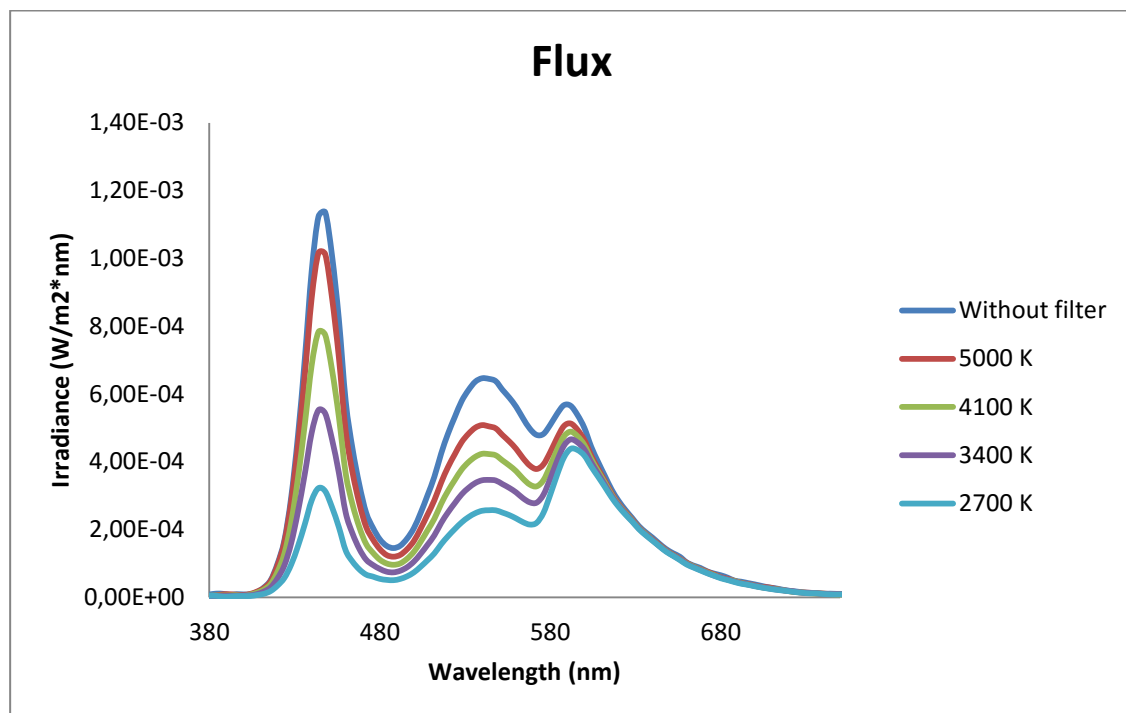


Figure 2. *f.lux* filters' action on the irradiance spectrum.

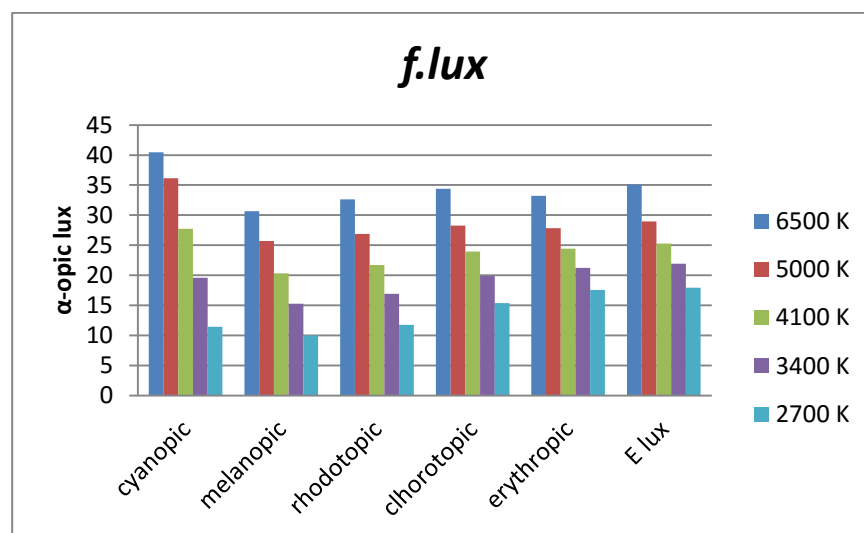


Figure 3. Circadian responses of *f.lux* filters.

Reticare filters

Firstly, it should be noted that the *Reticare* filters were placed on the screen of the Asus laptop described above. However, since the area of these filters is smaller than the screen area, the remaining area of the laptop screen was covered so that this region could not provide

erroneous measurements. With these conditions, it was possible to obtain the measurements presented below.

Figure 4 illustrates the curve of spectral irradiance for the screen without filters and with the superposition of *Reticare* sheets corresponding to intense, high and medium filters.

In all cases there is a peak in the band of blue 448 nm, characteristic of blue light emitted by LEDs RGB. Although the filters affect the height of the peak, the attenuation is low. The rest of the visible spectrum remains nearly unaltered. In view of the results, the effect of these types of filters is very poor. Visually, the slight decrease in the intensity of the blue region of the spectrum results in yellowish images.

Figure 5 shows circadian photoreceptor responses in front the effect of these hardware filters, and total lighting of the screen. As it was expected in view of the respective spectra, the values obtained do not vary much from one filter to another. 19lux are emitted when the screen does not have any filter are, while this value is reduced to 18lux with the superposition of the most intense filter. Recall that the laptop screen was partially covered and therefore the measurement of the unfiltered light is quite lower than as shown in **figure 2**. Taking the value of 20lux-Mel as a preventive threshold for melanopic output, it can be concluded that the screen (partially covered) with no filter does not present a remarkable alteration of circadian rhythm.

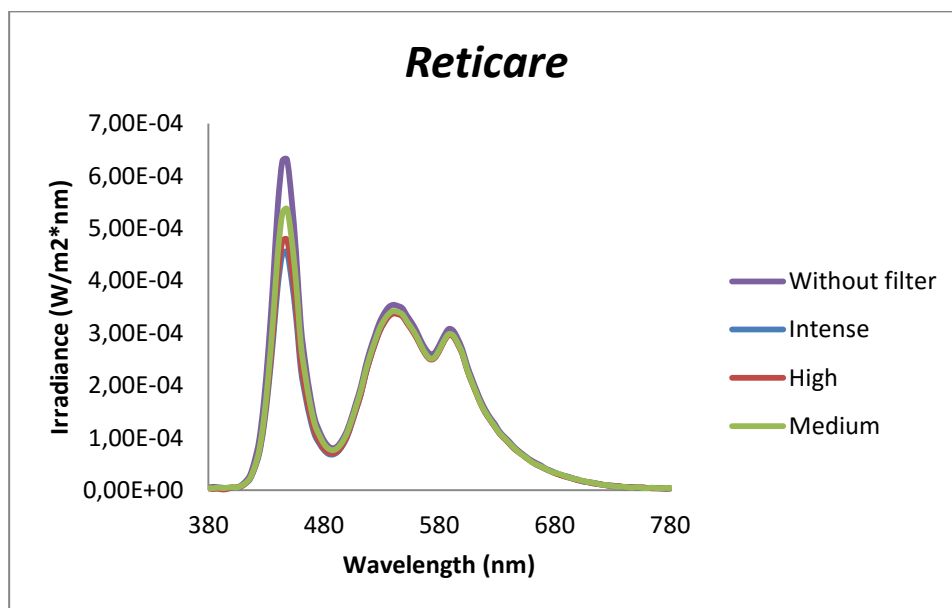


Figure 4. Reticare filters' action on the irradiance spectrum.

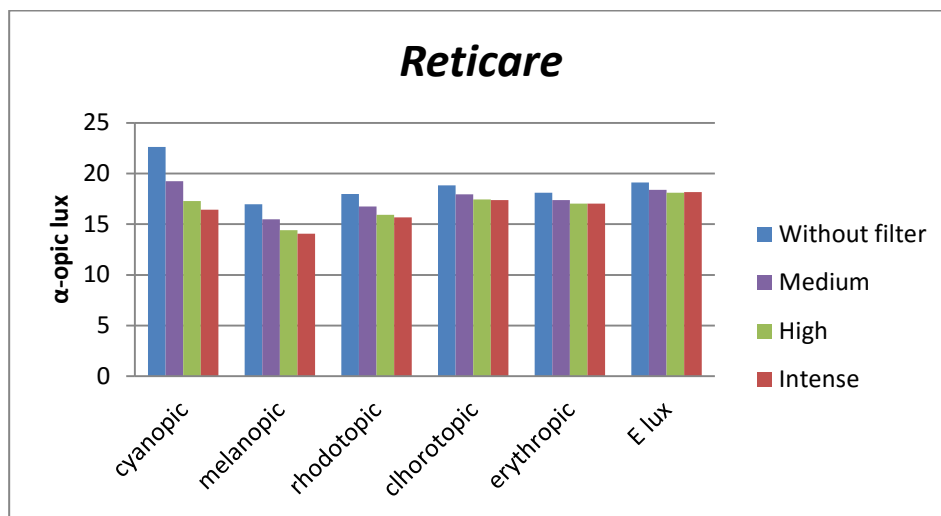


Figure 5. Circadian responses of *Reticare* filters.

4. Conclusions

With this project it has been possible to confirm not only the emission peak for short wavelengths in LEDs RGB backlit screens (although these results are not presented in this summary) but also the fact that screens' irradiance, given the same viewing distance, depends directly on the size of it, being greater in laptop's screens than in mobile phones.

Given the negative effects of exposure to blue light on circadian rhythms, different software applications available depending on the electronic device used and its operating system have been analysed. Furthermore, it has also been compared the effect of these blue software filters with commercial hardware filters, such as absorbent sheets placed on screens or filters incorporated in lenses.

Due to space limitations, this summary only presents the action of two blue filters, one for hardware and one for software, in front of the spectral irradiance of the same laptop screen. *F.lux* software filters alter significantly the spectral irradiance of the screen and have a significant action on circadian light. 3400K and 2700K filters are suitable for working at night with this type of screen. Conversely, *Reticare* hardware filters reduce slightly the peak intensity in the blue region and its action on circadian light is negligible. In both cases, the use of these filters induces a colour change of the images being more intense in the case of *f.lux* filters.

ÍNDEX

1. Introducció.....	4
2. Marc teòric.....	8
2.1. Espectre electromagnètic de les fonts de llum	8
2.1.1. Definició general	8
2.1.2. Exemples de fonts de llum	9
2.2. Què s'entén per la llum blava?.....	11
2.2.1. El LED.....	11
2.2.1.1. Història del LED	11
2.2.1.2. Dispositius LED	13
2.2.2. Pantalles LCD	13
2.3. Efectes nocius de la llum blava en la visió	15
2.3.1. Ull com a receptor de la llum	15
2.3.2. La retina	15
2.3.2.1. Introducció.....	15
2.3.2.2. Histologia i estructura	16
2.3.2.3. Cons i Bastons	16
2.3.2.4. Melanopsina i cèl·lules IpRGC.....	17
2.3.3. Risc de la llum blava o <i>Blue Hazard</i>	19
2.3.4. Ritmes circadians	20
2.3.5. Mesura de la llum circadiana.....	22
2.4. Protecció dels efectes nocius que produeix la llum blava	26
2.4.1. Filtres interns.....	26
2.4.1.1. Cristal·lí	27

2.4.1.2. Pigment macular.....	28
2.4.2. Filtres externs.....	29
2.4.2.1. Hardware.....	29
2.4.2.1.1. Filtres de làmines absorbent.....	29
2.4.2.1.2. Filtres en lents oftàlmiques	30
2.4.2.2. Software	30
2.4.2.2.1. <i>Twilight</i>	31
2.4.2.2.2. <i>Filtro luz azul</i>	31
2.4.2.2.3. <i>Blue Light Eyecare</i>	31
2.4.2.2.4. <i>Nigth Shift</i>	32
2.4.2.2.5. <i>f.lux</i>	33
2.4.2.3. Recomanacions per a disminuir l'efecte de les pantalles	33
3. Objectius i hipòtesis.....	35
4. Metodologia	36
4.1. Material.....	36
4.1.1. Dispositius electrònics analitzats i els seus sistemes d'il·luminació	36
4.1.2. Espectroradiòmetre. Mesures radiomètriques i fotomètriques.	38
4.2. Mètode.....	39
4.2.1. Descripció dels paràmetres de control de les aplicacions <i>Android</i>	39
4.2.2.1. <i>Twilight</i>	39
4.2.2.1.3. <i>Filtro luz azul</i>	39
4.2.2.1.2. <i>Blue Light Eyecare</i>	39
4.2.2. Descripció de l'app per mòbils amb sistema operatiu <i>IOS</i>	40
4.2.2.1 <i>Night Shift</i>	40

4.2.3. Descripció de l'app per ordinador.	40
4.2.3.1 <i>f.lux</i>	40
4.2.4. Làmines <i>Reticare</i>	40
4.2.5. Filtres en lents oftàlmiques.....	41
4.3. Implicacions ètiques.....	41
5. Resultats i discussió	42
5.1. <i>Twilight</i>	42
5.2. <i>Filtro luz azul</i>	46
5.2.1. Filtre Groc	46
5.2.2. Filtre Gris	48
5.3. <i>Blue Light Eyecare</i>	51
5.4. Comparació d'aplicacions Android	53
5.5. <i>Night Shift</i>	54
5.6. <i>f.lux</i>	56
5.7. Làmines d'absorció selectiva <i>Reticare</i>	59
5.8. Lents oftàlmiques.....	61
5.9. Imatges	64
5.10. Discussió dels resultats obtinguts	66
6. Conclusions i treballs futurs	68
7. Bibliografia.....	70

1. Introducció

En la nostra societat, cada dia en major mesura, fem ús de dispositius electrònics que incorporen pantalles per visualitzar dades, ja sigui per treballar o en activitats d'oci. Aquests aparells inclouen telèfons mòbils, tauletes gràfiques, ordinadors de sobretaula o portàtils, televisors, GPS, etc. En general, el conjunt d'aquests dispositius ens ajuda a millorar la nostra comunicació amb qualsevol punt del món, ens permet estar ben informats, realitzar transaccions a distància i molts altres avantatges. Es calcula que la tercera part de la població adulta passa de mitjana entre 4 i 6 hores al dia davant de pantalles digitals, fins hi tot, en un 14% dels casos, s'arriba a les 10-12 hores.

Cada vegada més, les pantalles d'aquests dispositius consisteixen en pantalles de cristall líquid o LCDs (de l'anglès *Liquid Crystal Display*) retro-il·luminades, és a dir, incorporen un sistema d'il·luminació posterior que ens permet utilitzar-los fins i tot amb manca de llum ambient. A més, el ràpid desenvolupament de les fonts de llum LED en general, i la invenció del LED blau en particular, ha fet que la majoria de les pantalles digitals d'avui dia utilitzin la tecnologia LED per aconseguir il·luminacions més eficients des del punt de vista energètic, amb millor contrast, i una gamma de colors molt àmplia. El sistema LED més utilitzat actualment per la retro-il·luminació de les pantalles és la combinació de tres LEDs: vermell, verd i blau (RGB de les sigles en anglès), que amb l'emissió simultània dels tres LEDs, obtenim la llum blanca.

Tot i els molts avantatges que presenten els LEDs davant de sistemes d'il·luminació més antics, aquests també presenten algun inconvenient. L'espectre d'emissió de les pantalles il·luminades amb tecnologia LED tenen un pic màxim de radiació a la franja dels blaus. Les longituds d'ona d'aquest tipus de llum estan compreses entre els 380 i 500 nm, i consisteixen en la radiació més energètica dins l'espectre visible, i per tant, la potencialment més nociva de la que es transmet dins els nostres ulls a través de la còrnia, el cristal·lí i els humors, fins arribar a la retina. Hi ha estudis que demostren que sotmetre la retina a l'exposició prolongada de llum blava de certa intensitat pot provocar la mort de cèl·lules retinianes. També existeix el terme de *Blue Hazard* o risc potencial de la llum blava, sobretot en entorns on es treballa amb soldadors que emeten quantitats molt importants de radiació en el visible i que poden comportar lesions irreversibles en l'ull humà.

En una escala diferent, però, trobem les emissions de les pantalles, que sense arribar a determinar que puguin causar un dany irreversible en la retina, si que s'ha demostrat que, amb exposicions prolongades a determinades hores del dia, poden alterar significativament el cicle circadià, el cicle biològic que regula l'estat d'alerta i son en els éssers vius. Això és principalment degut a l'existència d'uns fotoreceptors a la retina, diferents dels ben coneguts cons i bastons, que són les cèl·lules ganglionars intrínseques fotoreceptives (ipRGC) amb la melanopsina que s'excita al rebre la llum, especialment en la banda dels blaus de l'espectre visible. La reacció d'aquesta opsina provoca la supressió de la melatonina o hormona de la son, de manera que el cos, davant la incidència de llum en el sistema visual, es manté despert i alerta. Quan no hi ha aquesta incidència de llum, la melatonina es comença a produir i a distribuir per la sang, donant l'ordre al cos de preparar-se pel descans.

Així doncs, l'emissió de les pantalles, especialment en la zona dels blaus, i durant les hores on ja no hi ha llum natural, sembla ser la responsable d'alterar el ritme circadià en els humans. Donada la gran presència de pantalles en dispositius electrònics d'ús molt comú en la nostra societat, hi ha un interès creixent per estudiar l'espectre d'emissió de les pantalles digitals, i trobar mètodes de reduir l'emissió específicament de la llum blava.

En aquest sentit, recentment han aparegut al mercat el que es denominen amb el terme comú de filtres de llum blava. Aquests, són filtres que atenuen la transmissió de la llum blava de la pantalla, i permeten reduir la radiació de longitud d'ona curta que arriba a la retina. En molts casos, els fabricants parlen de minorar la fatiga visual amb l'ús d'aquests filtres i en cap cas especifiquen les característiques tècniques d'aquests elements, com per exemple quin és el seu rang d'absorció o a quin lloc de l'espectre es situa el seu màxim d'atenuació. Els filtres que existeixen poden ser bàsicament de tipus hardware o software. Els primers, els filtres externs o hardware, o bé consisteixen en una làmina d'absorbència selectiva que se superposa a la pantalla del dispositiu, o bé s'incorporen com un tractament addicional a les lents oftàlmiques de l'usuari. Els filtres per software són aplicacions dissenyades per al dispositiu electrònic, que mitjançant la seva activació i el control d'un o varis paràmetres, es pot modificar l'emissió de la pantalla digital, permeten reduir la component blava d'aquesta radiació. Aquestes aplicacions són diverses en funció de si es tracta d'un mòbil, una tauleta gràfica o un ordinador.

En el nostre treball, ens centrarem en l'estudi d'algunes d'aquestes aplicacions (o *apps* del terme en anglès) que ens ajuden a atenuar l'emissió de longitud d'ona blava en diferents

aparells. En primer lloc mirarem quines aplicacions estan disponibles al mercat i escollirem les més adients en funció dels dispositius avaluats. En concret, analitzarem tres aplicacions del sistema operatiu *Android* per a una tauleta *Acer Inconia One 7*, estudiarem l'efecte de l'aplicació incorporada recentment pel sistema operatiu *IOS* en el mòbil *Iphone 5s*, i finalment ens centrarem en l'aplicació *f.lux* disponible per ordinadors (tant de sistema operatiu *Windows* com *Mac*) en un portàtil *Asus* model *F555L*.

Amb l'ajuda d'un l'espectroradiòmetre "Photo Research PR-715" es faran diferents mesures d'irradiància espectral de les pantalles, quan aquestes mostren una imatge completament blanca i uniforme a la màxima intensitat possible. Es modificaran els paràmetres de control de cada una de les aplicacions per estudiar el grau d'atenuació dels filtres que reproduïxen. Per a un mateix dispositiu, es podran comparar els resultats obtinguts amb diverses aplicacions, quan aquestes siguin accessibles.

El fet de modificar l'espectre de la radiació emesa per la pantalla, provoca que l'aplicació d'aquests filtres inevitablement altera els colors de les imatges que es mostren a la pantalla. Per aquest motiu, també estarem interessats en analitzar les coordenades cromàtiques *xy* dels sistema *CIELAB 1931*, que ens ofereix l'espectroradiòmetre per cada mesura amb diferent grau d'atenuació proporcionat pels filtres software.

A partir de les mesures obtingudes amb l'espectroradiòmetre, mesurarem la resposta dels diferents fotoreceptors presents a la retina. Per aconseguir-ho partirem de la irradiància espectral mesurada que arriba sobre la còrnia. Aplicant unes corbes de resposta de cada fotoreceptor, calcularem l'equivalent en lux per a cada un dels cinc fotoreceptors (tres cons, els bastons, i les ipRGC) i ho compararem amb el llindar d'alteració del ritme circadià segons el percentatge de supressió de melatonina.

El fet d'analitzar diferents dispositius electrònics, amb pantalles de mida diferents, també ens permetrà avaluar l'efecte de la radiació de cada pantalla sobre els sistema visual. És de preveure que les pantalles d'àrea més gran, emetran més quantitat de radiació, provocant un efecte més gran en els fotoreceptors.

Finalment també es vol comparar l'efecte dels filtres per software amb els filtres hardware més coneguts. Mesurarem l'espectre d'emissió de la pantalla del portàtil quan en ella es superposen les làmines *Reticare* absorbents de la llum blava, amb diferent intensitat. També

valorarem l'atenuació de la llum blava obtinguda amb l'ús d'algunes lents oftàlmiques a les que s'ha incorporat un filtre per a la llum blava.

L'anàlisi conjunta de totes les dades ens permetrà avaluar els diferents sistemes de filtratge accessibles actualment, i destacar-ne les seves diferències.

Per tot això, la memòria que es presenta s'estructura amb una primera part on es revisa l'estat de l'art d'aquesta temàtica, explicant breument els conceptes més relacionats amb l'estudi que es vol portar a terme.

A continuació s'exposaran els objectius principals del treball, i la hipòtesi de partida. Es descriurà el material i la metodologia emprada durant la realització del treball. Es presentaran els resultats obtinguts, per acabar amb les conclusions més destacables de tot l'anàlisi. Finalment, es proporciona un recull de la bibliografia consultada i la més rellevant en el tema d'estudi, que inclou tant llibres, articles a revistes com pàgines web.

2. Marc teòric

2.1. Espectre electromagnètic de les fonts de llum

2.1.1. Definició general

Es denomina espectre electromagnètic a la radiació electromagnètica que emet (espectre d'emissió) o absorbeix (espectre d'absorció) un objecte. La ciència que estudia la mesura de la radiació electromagnètica es coneix com Radiometria.

L'espectre electromagnètic es divideix en diferents regions dependent de la longitud d'ona. Les longituds d'ona majors són les de radio, seguides de les microones, els infraroigs, la llum visible, els raigs ultraviolats, els raigs X. Les longituds d'ona més petites són els raigs Gamma i els raigs còsmics, com s'explica a la **figura 2.1**.

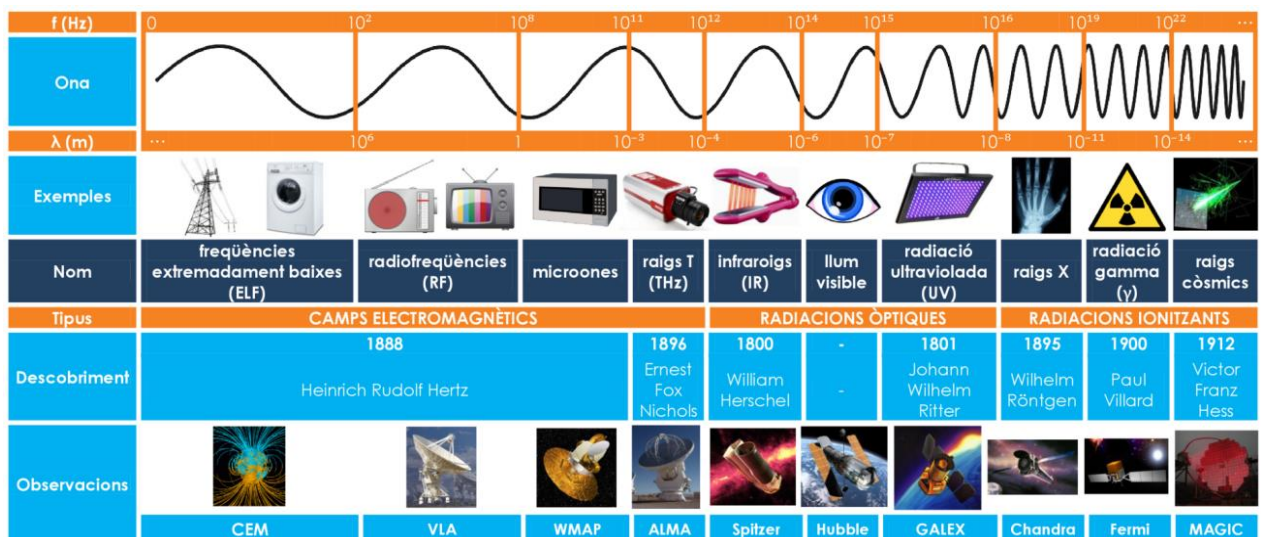


Figura 2.1. Esquema de l'espectre electromagnètic i exemples.

Els aparells que mesuren la radiància espectral donen valors de densitat espectral $W_{e\lambda}$, que és la potència emesa per interval de longitud d'ona. D'aquesta manera el flux radiant F_e emès per una font de llum val:

$$F_e = \sum_{\lambda_1}^{\lambda_n} W_{e\lambda} \Delta\lambda \quad (1)$$

la seva unitat és el Watt (W).

L'ull humà és sensible a una estreta franja de l'espectre electromagnètic que correspon a les longituds d'ona compreses entre els 380nm dels colors violeta/blau i els 780nm corresponent a la franja del vermell. És el que anomenem llum visible que comprèn les freqüències $7,89 \cdot 10^{14}$ i $3,85 \cdot 10^{14}$ Hz. A més, dins del que coneixem com a espectre visible, la sensibilitat de l'ull és diferent per a cada valor de longitud d'ona. Aquesta sensibilitat ve determinada per la corba V_λ , que és la funció que s'utilitza per realitzar mesures de la radiació electromagnètica visible.

El flux lluminós F_v ve definit per:

$$F_v = k \sum_{\lambda_1}^{\lambda_n} W_{e\lambda} V_\lambda \Delta\lambda \quad (2)$$

i s'expressa en lúmens (lm). La constant k pren el valor de 683 lm/W.

D'aquesta manera, el flux radiant (F_e) s'ha de multiplicar pel factor corrector de sensibilitat espectral de l'ull (V_λ) per a cada longitud d'ona, de manera que podem tenir una mesura que estigui directament relacionada amb la resposta d'aquest ull a l'estímul de radiació electromagnètica. A aquestes mesures corresponents a l'espectre visible, en què s'utilitza la funció V_λ , se les anomena mesures fotomètriques, i constitueixen la ciència que coneixem com a Fotometria. **[Millan 2003]**

2.1.2. Exemples de fonts de llum

Dins la franja del visible es troben les fonts d'il·luminació que utilitzem dia a dia. Aquestes fonts van des de la llum d'una espelma fins als dispositius electrònics més moderns com ara els LEDs. Cada font de llum té un espectre electromagnètic diferent de la resta. A la **figura 2.2** es mostren les gràfiques d'irradiància espectral ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$) per a diferents fonts de llum.

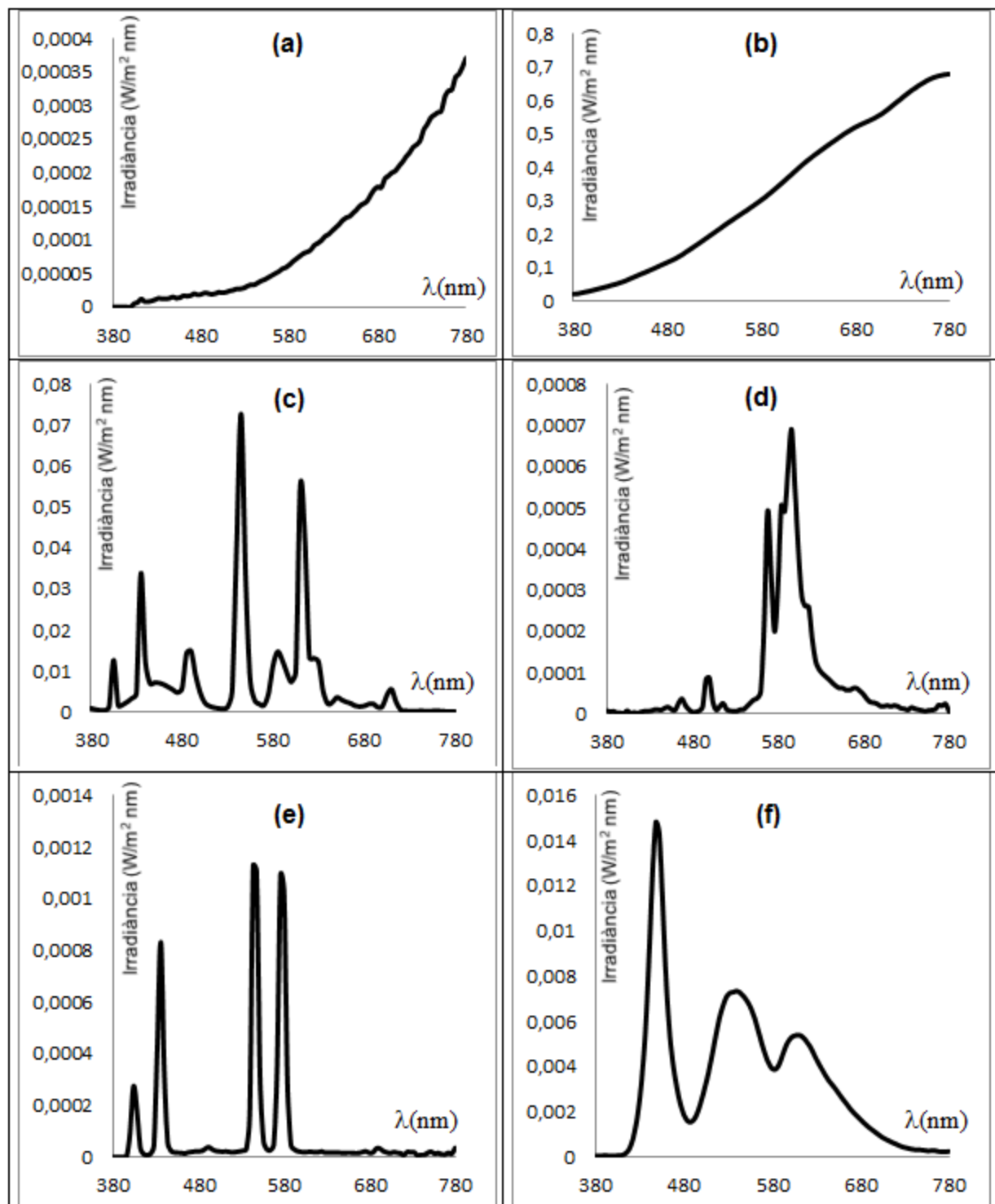


Figura 2.2. Irradiància espectral respecte la longitud d'ona (nm) de: (a) Espelma, (b) Halògena, (c) Fluorescent, (d) Sodi d'alta pressió, (e) Mercuri i (f) LED.

2.2. Què s'entén per la llum blava?

La llum blava forma una part de l'espectre del visible entre les longituds d'ona de 380 nm i 500 nm. Són fonts de llum blava, entre altres, la llum de dia així com les fonts de llum LED. Avui dia passem moltes hores davant de dispositius electrònics amb pantalles tipus LED, emissors principals de llum blava artificial. Aquest dispositius són monitors, tauletes mòbils, televisors..., als quals hi dediquem gaire bé tot el dia i part de la nit. A continuació descriurem la font de llum blava artificial més utilitzada que són els LEDs.

2.2.1. El LED

2.2.1.1. Història del LED

La sigla LED es deu a la expressió "*light emitting diode*" (díode emissor de llum).

L'any 1961, Bob Biard i Gary Pittman, van descobrir que quan s'aplica un corrent elèctric a un semiconductor díode compost per arseniür de gal·li (GaAs) s'emetia radiació infraroja no visible per l'ull humà. Al principi aquest descobriment es va utilitzar principalment pel control remot d'equips, com comandaments a distància o diferents electrodomèstics. [Chamorro 2013]

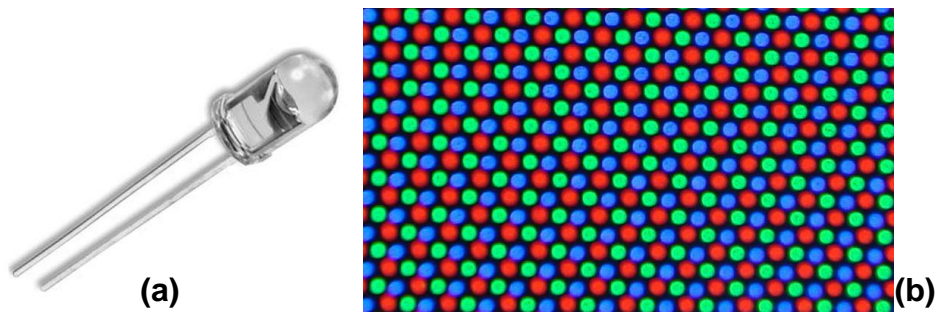


Figura 2.3. (a) Díode de LED blanc. (b) Xarxa de díodes LED.

L'any següent, el físic nortamericà Nick Holonyac va fabricar el primer LED vermell que emetia en llum visible. Més tard, al 1972, George Craford va descobrir el primer LED de llum groga.

Als anys 90, l'investigador japonès Shuji Nakamura, va dissenyar un LED que emetia en la franja dels verds i més tard el que emetia a la franja dels blaus. Amb els LEDs emetent en els tres valors primaris va ser fàcil obtenir llum blanca.

Fins a mitjans dels anys 90, els LEDs tenien un flux lluminós baix i poca eficàcia, per això només s'utilitzaven en làmpades de senyalització. Al 2006 es van produir els primers díodes de llum amb 100 lm per watt, només superada per les làmpades de descàrrega de gas. En la actualitat, la eficàcia dels LEDs és comparable a la de les làmpades de descàrrega i el flux lluminós d'un LED pot ser més gran que el de una làmpada incandescent de 75 watts. En condicions de laboratori, s'estan creant LEDs amb eficàcies lluminoses de 250 lúmens per watts.

Al 2014 Isamu Akasaki, de les Universitats de Meijo i Nagoya del Japó, Hiroshi Amano de la Universitat de Nagoya i Shuji Nakamura de la Universitat de Califòrnia, Santa Bàrbara, van ser reconeguts amb el Premi Nobel de Física 2014 per la "invenció dels díodes emissors de llum blava eficient, que han permès fonts de llum blanca brillants i que estalvien energia".

Els LED poden tenir una vida útil de fins 50000h i s'espera noves millores que faran que els LEDs blancs tinguin una eficàcia entorn de 15 vegades la de les làmpades incandescentes.

[Barbero 2015]

Tenint en compte que l'espectre d'un sol LED és sempre estret, un mètode habitual per obtenir llum blanca consisteix en combinar chips de LED vermells, verds i blaus en un sol mòdul. És el que s'anomena "triada RGB" (**figura 2.4**).

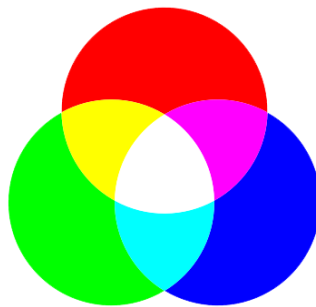


Figura 2.4. La triada vermell - verd - blau, coneguda també com RGB (*Red, Green, Blue*).

Una altre solució possible per obtenir llum blanca és l'ús d'un chip de LED blau o ultraviolat junt amb material fluorescent que converteixi gran part de la llum blava en llum amb diferents longituds d'ona distribuïda per gaire bé tot l'espectre del visible. Aquest material fluorescent es coneix com a fòsfor, per tant el LED es diu LED de fòsfor blanc.

Les fonts LED de llum blanca que acabem de descriure estan fetes amb materials semiconductors inorgànics, i s'està investigant en la nova tecnologia OLED (díode orgànic d'emissió de llum). És un díode el qual el seu principi bàsic es basa en una capa electroluminescent formada per una pel·lícula de components orgànics que reaccionen, a una determinada estimulació elèctrica, generant i emetent llum per si mateixos.

2.2.1.2. Dispositius LED

L'ús de fonts d'il·luminació LED està creixent de manera exponencial tant en el camp de la il·luminació d'interiors i exteriors, com les llums dels vehicles, senyalització (com els semàfor), dispositius personals i domèstics (comandaments a distància d'aparells electrònics, pantalles de visualització de dades (PVD), tauletes, mòbils i ordinadors).

Degut que en aquest treball ens centrarem en les pantalles, a continuació descriurem breument el funcionament de les pantalles LCD, les més utilitzades a l'actualitat, fixant-nos principalment en el seu sistema d'il·luminació.

2.2.2. Pantalles LCD

Les pantalles LCD formen part de la immensa majoria de dispositius electrònics que permeten la visualització de dades. El seu nom LCD es deu a les sigles en anglès *Liquid Crystal Display*. Contenen una capa de cristall líquid, que com el seu nom indica, és un material que manté propietats dels sòlids, i a la vegada dels líquids. Les seves molècules tendeixen a mantenir una certa posició (com les molècules d'un sòlid), però també tenen certa fluïdesa que els permet orientar-se en funció de les condicions externes (com les molècules dels líquids).

Els panells LCD són dispositius òptics controlats electrònicament. La seva estructura es pot canviar amb la aplicació d'un camp elèctric exterior. Així les molècules poden modificar la polarització de la llum incident en funció de la seva orientació en el cristall líquid.

Les pantalles LCD no emeten llum pròpia i requereixen un sistema d'il·luminació. Segons l'aplicació del dispositiu, podem trobar LCD il·luminades per la llum ambient externa a l'aparell, o bé, en molts casos, poden contenir una font de llum adicional denominada habitualment com a retro-il·luminació o *backlight*. Aquestes darreres són en les que ens centrarem en aquest treball, i per la qual cosa, descriurem quines característiques sol tenir aquest sistema de retro-il·luminació.

Fins fa poc temps les fonts de llum més utilitzades per il·luminar aquestes pantalles eren les làmpades fluorescents o CCFL (de l'anglès, *Cold Cathode Fluorescent Light*), però en l'actualitat han estat substituïdes per fonts LED, les quals presenten els següents avantatges:

- Major rendiment lluminós i millor contrast de les imatges, ja que es pot controlar la brillantor dels díodes per separat.
- Major gamma de colors.
- Disminució del consum (un 30% davant el consum dels CCFL).
- Menor espessor de la pantalla.
- Menor contaminació (no contenen mercuri).
- Esperança de vida més llarga entre 35000h i 50000h (entre 4 i 5,7 anys en continu funcionament).
- El seu temps d'encesa pot ser inferior a 1 μ s.

No obstant també trobem algun inconvenient:

- El cost de fabricació de les pantalles il·luminades per LED són més cares que les CCFL. Si comparem una pantalla de LEDs i una de CCFL, es necessita més quantitat de díodes que fluorescents, encara que els LEDs individualment és més econòmic.
- L'espectre emissor d'un LED pot afectar al sistema visual i als ritmes circadians.

A l'igual que els sistemes que utilitzen làmpades fluorescents, els sistemes de retro-il·luminació més actuals per LEDs, mantenen bàsicament dos dissenys del sistema d'il·luminació:

- Il·luminació directa, amb els LEDs repartits homogèniament per tota la superfície posterior de la pantalla. Això fa que es puguin variar la il·luminació posterior per àrees, i d'aquesta manera aconseguim millors contrastos.
- Il·luminació de vora, amb els LEDs situats a les vores de la part posterior de la pantalla. Necessita una guia que distribueixi la llum per tota l'àrea de la pantalla, però s'aconsegueix disminuir l'espessor respecte el sistema d'il·luminació directa.

2.3. Efectes nocius de la llum blava en la visió

2.3.1. Ull com a receptor de la llum

L'ull és l'òrgan principal de la visió, mitjançant el qual captem les sensacions de la llum i el color. Per tenir la percepció d'un objecte serà necessari que l'objecte enviï llum. Aquesta llum pot ser intrínseca de l'objecte (font primària com ara pantalles o bombetes) o com a conseqüència d'un il·luminant extern (font secundària com ara parets, roba, etc...).

Realment l'òrgan que s'encarrega del procés de la visió és el cervell. L'ull té la funció de captar i traduir les vibracions electromagnètiques de la llum a un determinat tipus d'impuls nerviós que es transmet al cervell a través del nervi òptic.

Totes les parts que formen l'ull ajuden d'una manera o altre al procés visual, ja sigui per evitar que entri una brossa a l'ull com les parpelles, com els fotoreceptors que capten la llum incident.

Les parts que formen l'ull es mostren esquemàticament a la **figura 2.5**.

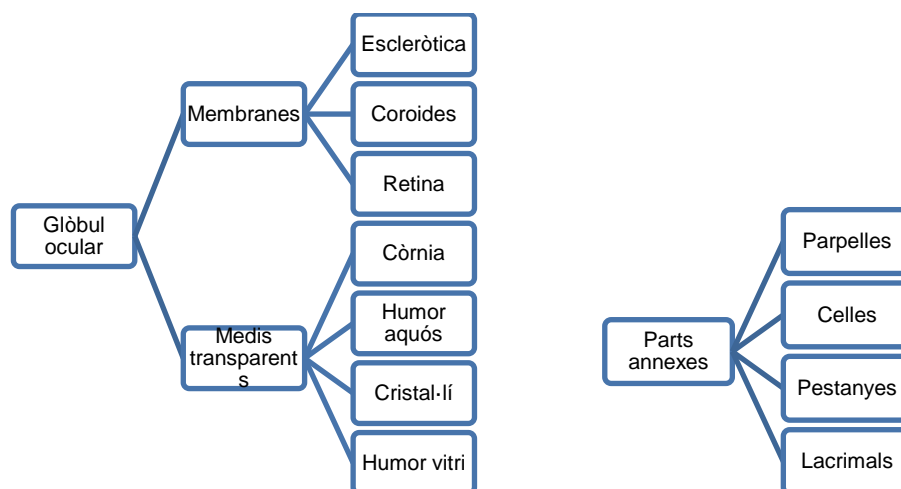


Figura 2.5. Parts que formen l'ull.

2.3.2. La retina

2.3.2.1. Introducció

La retina és la part especialitzada del sistema nerviós destinada a recollir, elaborar i transmetre les sensacions visuals. La retina constitueix una fina làmina transparent entre la coroides i l'humor vitri.

Es distingeixen els següents elements:

1. Cèl·lules pigmentaries amb funció d'absorció de la llum dispersa, transport actiu de metabòlits, fagocitosi, regeneració dels pigments visuals i provisió d'una barrera hematorretiniana.
2. Cèl·lules glials que fan funció de fixació de la retina, generen impulsos nerviosos i constitueixen el principal element del teixit cicatricial de la retina.
3. Elements neuronals de recepció d'estímuls i conducció de l'impuls nerviós fins el sistema nerviós central.
4. Elements vasculars on s'encarreguen de la nutrició i oxigenació de la retina.

2.3.2.2. Histologia i estructura

La retina està dividida en 10 capes tal i com es mostra en la **figura 2.6**.

1. Epiteli pigmentari (EPR)
2. Cons i bastons (cèl·lules fotoreceptores)
3. Membrana limitant externa
4. Nuclear externa
5. Plexiforme externa
6. Nuclear interna
7. Plexiforme interna
8. De cèl·lules ganglionars (ipRGC)
9. De les fibres del nervi òptic
10. Limitant interna.

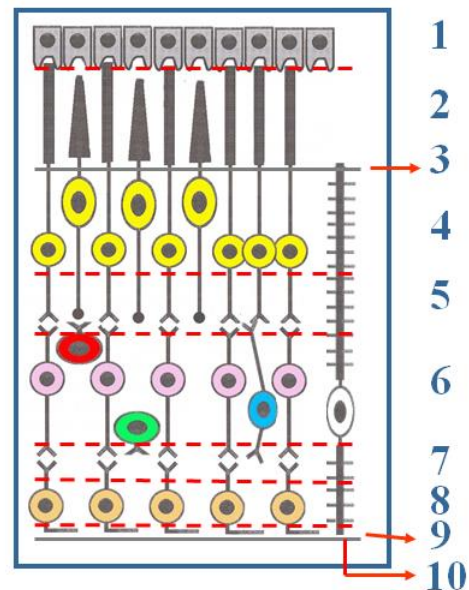


Figura 2.6 Capes de la retina.

2.3.2.3. Cons i Bastons

Els fotoreceptors visuals són neurones de la retina sensibles a la llum. N'hi ha de dos tipus, els bastons i els cons. Ambdós tenen un cos cel·lular on es troba el nucli i separa dues expansions diferents, l'externa i la interna. El nucli és més gran als cons que als bastons.

L'expansió externa es divideix en dos segments, l'extern i l'intern, els quals estan units per un cili de connexió. El segment extern dels cons és diferent del dels bastons on es troba el pigment visual. A l'interior trobem plects de la membranes cel·lular amb continuïtat als cons i discs independents als bastons (**figura 2.7**).

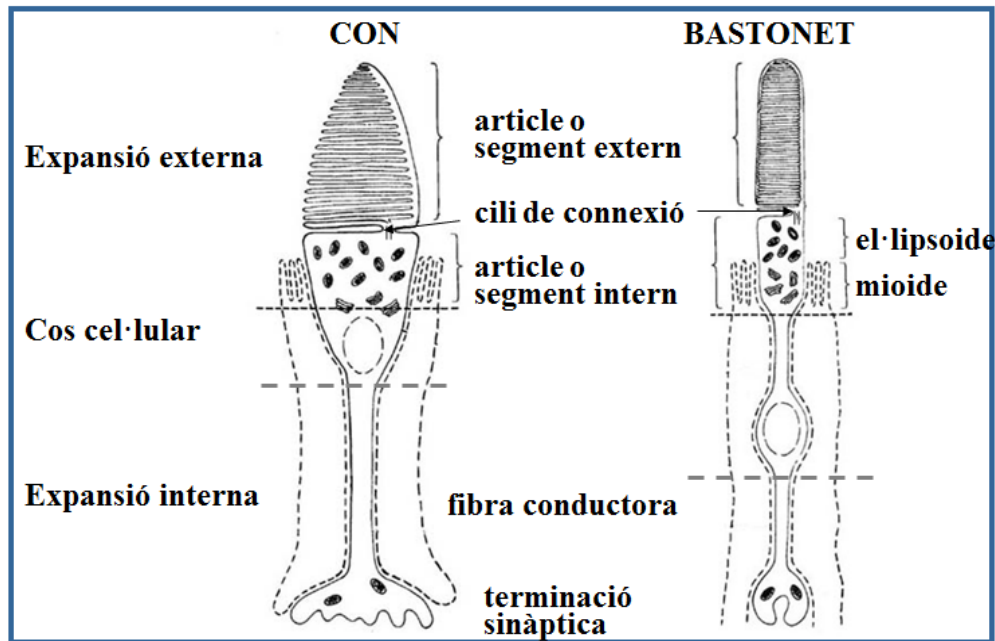


Figura 2.7. Estructura d'un con i un bastó.

A la paret de la membrana dels discs, en el cas dels bastons, i plects, en el cas dels cons, trobem el fotopigment compost per una proteïna anomenada opsina i un lípid, el retinal.

El fotopigment dels bastons és la rodopsina, la qual la s'anomena escotopsina (SC) utilitzada per la visió en la foscor. El dels cons és la iodopsina o conopsina utilitzada per la visió del color. Existeixen tres tipus de cons amb fotopsines sensibles a diferents longituds d'ona, el blau, el verd i el vermell.

La llum que incideix a la retina activa els fotopigments dels fotoreceptors visuals i mitjançant impulsos nerviosos envia la informació al cervell. Aquest procés s'anomena fototransducció.

2.3.2.4. Melanopsina i cèl·lules IpRGC

La melanopsina és una proteïna integral de membrana que conté 534 aminoàcids. Aquest fotopigment converteix la llum en un impuls nerviós de la mateixa manera que ho fa la fototransducció dels bastons i cons. La melanopsina va ser identificada en els vertebrats

concretament en amfibis, al 1998 per Provencio, et al **[Provencio 1998]**. Dos anys després, el mateix equip va descobrir que en els humans la melanopsina només es troba a la retina.

[Augusto 2015]

Les cèl·lules que contenen la melanopsina, són les cèl·lules ipRGC (cèl·lules ganglionars fotoreceptores intrínsecament fotosensibles). Aquestes cèl·lules participen en diversos processos fisiològics diferents de la formació d'imatges, com el reflex pupil·lar i la sincronització dels ritmes circadians de la llum.

L'impuls nerviós provinent dels cons i bastons és transmet a través de senyals sinàptiques fins a les cèl·lules ganglionars retinianes (RGC), els axons de les quals que formen el nervi òptic, arriben fins l'encèfal per la formació d'imatges. A diferència d'aquestes, les cèl·lules ipRGC els seus axons arriben fins el nucli supraquiasmàtic per regular la sincronització dels ritmes circadians.

Les ipRGC actuen com a fotoreceptors degut a la activitat de la melanopsina, aquest fotopigment actua de la mateixa manera que la rodopsina i la conopsina. En la retina únicament el 2% del total de les cèl·lules ganglionars contenen melanopsina, les quals s'activen per estímuls de longitud d'ona entre 400nm i 600nm, tenint el màxim als 480nm.

[Alberto 2009]

El descobriment de les ipRGC ha fet pensar als investigadors l'existència de nous fotopigments i fotoreceptors, com també fonamentar la idea de que la retina ajuda a la percepció del transcurs del dia a partir de la lluminositat ambiental.

2.3.3. Risc de la llum blava o *Blue Hazard*

El *Blue Hazard* es defineix com el potencial que existeix per una lesió fotoquímica de la retina, induïda pel resultat de l'exposició a la radiació electromagnètica en longituds d'ona emesa principalment entre 400 i 500 nm. No hi ha dubte que la nostra exposició a la llum blava-violeta artificial va en augment. Aquesta exposició constant es va acumulant amb el temps i té el potencial de causar dany a les cèl·lules de la retina, ja que va provocant lentament la mort cel·lular a la retina i pot causar degeneració macular.

El Sol és la principal font natural de llum blava, però els éssers humans també estan cada vegada més exposats a la llum blava de fonts artificials. La radiació solar conté entre un 25% i un 30% de llum blava, en canvi els llums incandescents convencionals tenen al voltant del 3% de llum blava. En el cas dels LEDs, aproximadament el 35% del seu espectre és de color blau.

El dany de la llum blava es produeix quan un fotoreceptor absorbeix energia dels fotons d'aquest color, posant en marxa una sèrie de reaccions químiques intracel·lulars. Els bastons, cons i les cèl·lules de l'epitel·li pigmentari (EPR) de la retina són rics en fotopigments, responsables de l'absorció de fotons i per tant estant exposats al dany fotoquímic.

La llum blava, doncs, pot causar danys tant a les cèl·lules fotoreceptores com a l'epiteli pigmentari de la retina. L'exposició acumulativa a la llum en el rang de 380 nm a 500 nm pot activar la molècula tot-trans-retinal (isomerització del cromòfor 11-cis-retinal) acumulada en els segments externs dels fotoreceptors. Aquesta llum blava fotoactiva el tot-trans-retinal i pot induir a la producció d'espècies reactives d'oxigen (ROS), com l'oxigen simple, peròxid d'hidrogen, i altres radicals lliures, en els segments externs dels fotoreceptors. La gran concentració de les membranes cel·lulars a la retina fa que sigui altament sensible a l'estrès oxidatiu. En particular, aquest estrès pot pertorbar les estructures membranoses dels segments externs dels fotoreceptors, causant la fagocitosi incompleta i la digestió dels segments exteriors oxidats a l'EPR. La conseqüència és una acumulació de la lipofuscina, producte de rebuig en grànuls de les cèl·lules de l'EPR.

En l'ull, la lipofuscina, també coneguda com "el pigment de l'edat," s'acumula amb els anys a un ritme més ràpid en algunes malalties de la retina. Compost de lípids, proteïnes, i un nombre de cromòfors, la lipofuscina és molt susceptible a canvis fotoquímics que poden produir danys cel·lulars permanents. L'acumulació de lipofuscina s'ha implicat en la

patogènesi de la DMAE (degeneració macular deguda a l'edat), i lesions d'atròfia a les vores de la retina (**figura 2.8**).

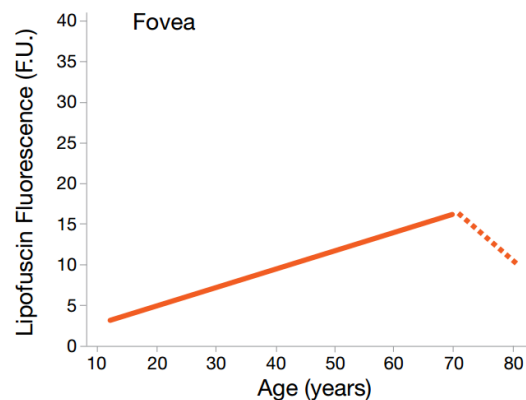


Figura 2.8. Nivells de liposfucina en la fòvea a diferents edats.

2.3.4. Ritmes circadians

Des d'una perspectiva evolutiva, l'exposició a la llum artificial és relativament recent. La vida a la Terra té milers de milions d'anys, on els dies s'organitzen en 24 hores amb una durada normal d'aproximadament 12 hores de llum i 12 hores de foscor a l'equador, que varia amb la latitud i les estacions al llarg de l'any. Aquest component fonamental de la nostra biologia, amb la funció principal de coordinar els ritmes biològics, està controlat per rellotges biològics endògens (està programat internament per l'organisme), i aquesta periodicitat té un profund impacte en els processos bioquímics, fisiològics i de comportament en gairebé tots els organismes vius.

En els mamífers, aquests ritmes es generen principalment pels marcapassos circadians. El principal d'ells està situat en el nucli supraquiasmàtic (NSQ) de l'hipotàlem, en el cervell (**figura 2.9**). El rellotge del NSQ pot funcionar de manera autònoma, sense cap intervenció externa, amb un període de prop de 24 hores. Per tal de que el període circadià sigui de 24 hores el rellotge del NSQ es sincronitza amb la llum. Per tant, el NSQ rep l'entrada dels estímuls interns i externs. La informació de la llum s'aconsegueix exclusivament pel tracte retino-hipotalàmic. Els sistemes de fotoreceptors de cons i bastons, necessaris per a la visió, semblen que també hi tenen un paper en la fotosensibilitat circadiana.

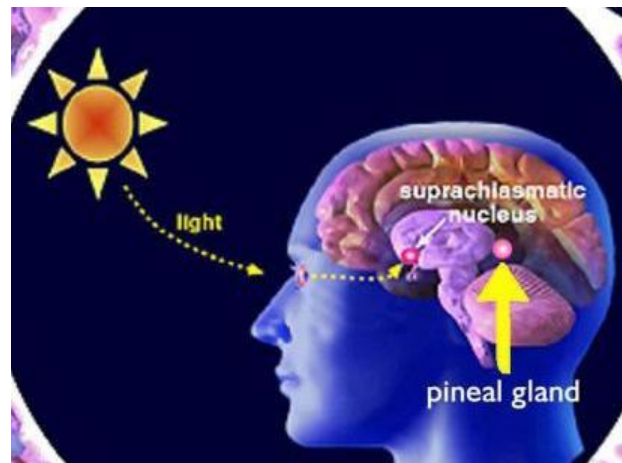


Figura 2.9. Posició del nucli supraquiasmàtic i de la glàndula pineal en el cervell humà.

El ritme circadià es regula principalment per la melatonina, N-acetil-5-metoxitriptamina, és una hormona ubicada en tots els grups d'organismes. En els vertebrats, incloent éssers humans, es sintetitza principalment en la glàndula pineal i immediatament és secretada a la sang. La melatonina es sintetitza durant la nit (normalment un pic 1-3 a.m.), mentre que durant el dia, la producció és pràcticament nul·la. La funció principal de la melatonina es considera que proporciona un senyal intern biològic ("el tercer ull") per a la durada de la nit, i un senyal per l'alba fins al vespre. A més, la melatonina s'ha demostrat en estudis *in vitro* que tenen propietats antioxidants així com elimina els radicals lliures.

La resposta del sistema circadiari a la llum, en general, quantificat pel grau de producció de la melatonina i la seva supressió, depèn del temps d'exposició a la llum, la seva durada, la seva intensitat i la composició espectral. La llum blava s'ha demostrat que exerceix un efecte més fort sobre la supressió de melatonina durant la nit que la llum blanca policromàtica.

A la **figura 2.10** podem veure com la producció de melatonina és molt baixa durant el dia i quan cau la nit comença a augmentar molt ràpidament. En el cas que estiguem exposats a llum blava artificial quan comença la nit, la producció de melatonina es mantindria com si fos de dia, això fa que s'alteri els ritmes circadians i s'escurcin les hores de descans. També amb el canvi d'estacions, les hores de llum del Sol queden modificades (a l'estiu el dia és més llarg que a l'hivern), cosa que fa que es produeixi menys melatonina a l'hivern que a l'estiu.

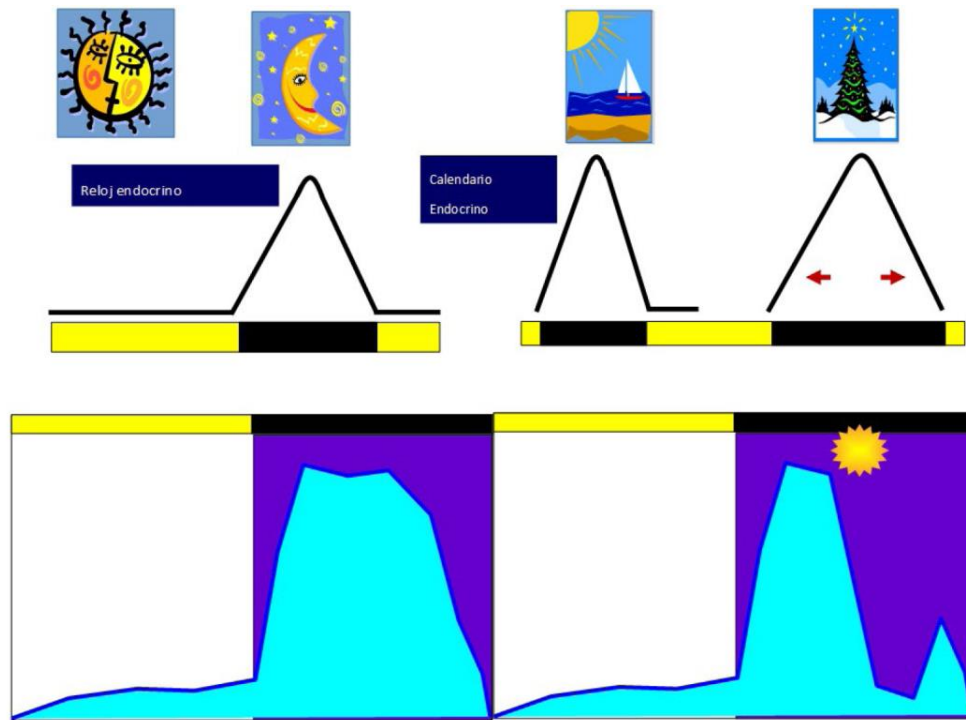


Figura 2.10. Producció de melatonina durant el dia i la nit, en diferents estacions i amb l'ús de llum artificial.

La llum s'instal·la normalment amb el propòsit d'il·luminar d'una forma beneficiosa l'espai per permetre el descans, l'oci o la feina. De la mateixa manera, persianes i finestres s'utilitzen sovint per evitar l'exposició a la llum diürna i facilitar el son perllongat, en particular amb els nens. És important destacar que la llum brillant permet una millor visió i afecta l'estat d'ànim en gairebé qualsevol entorn d'il·luminació pública o privada. Cal destacar també la temperatura de color està típicament adaptada a l'entorn específic, que és una característica important del disseny de la llum i l'arquitectura. Una alteració dels ritmes circadians pot provocar efectes psicològics a curt i llarg termini.

2.3.5. Mesura de la llum circadiana

Per mesurar l'efecte de la llum en el sistema circadià humà partirem de la irradiància espectral que incideix a la còrnia. Seguint la tradició de la fotometria visual la majoria de models quantifiquen la llum circadiana de manera lineal mitjançant una integral de pes del tipus:

$$J = K \sum E(\lambda) w(\lambda) \Delta\lambda \quad (3)$$

on $E(\lambda)$ és la irradiància espectral que incideix a la còrnia, $w(\lambda)$ la funció de pes i K una constant que serveix per escalar la funció.

Exemples d'aplicació d'aquesta fórmula els trobem en els treballs de Gall [Gall 2004a] [Gall 2004b], Brainard et al. [Brainard 2001] [Brainard 2008] i Thapan et al. [Thapan 2001].

No obstant això, una sola funció de pes és clarament insuficient per descriure la resposta del sistema circadià. A més de les cèl·lules ganglionars intrínseques fotoreceptives (ipRGC), els bastons i els cons S (*short cones*), els cons M (*medium cones*) i els cons L (*large cones*) tenen un paper rellevant en la regulació circadiana mitjançant una xarxa de complexes interaccions que tot just es comença a entendre.

Per descriure l'impacte de la llum en el sistema circadià Lucas et al. [Lucas 2014] proposen cinc funcions de pes diferents per a cada una de les opsines que s'exciten en rebre la llum i corresponen als cinc receptors descrits anteriorment: R (Rode opsin), M (melanopsin), SC (S cone opsin), MC (M cone opsine) i LC (L cone opsine). La **figura 2.11(a)** mostra esquemàticament els circuits retinals més rellevants per les respostes circadiana, neuroendocrina i neurofuncional del cos humà. La **figura 2.11(b)** mostra la resposta individual de cada una de les cèl·lules fotorreceptives que actuen com a un únic (encara que no prou conegut) senyal integrat quan deixa la retina i va cap el cervell.

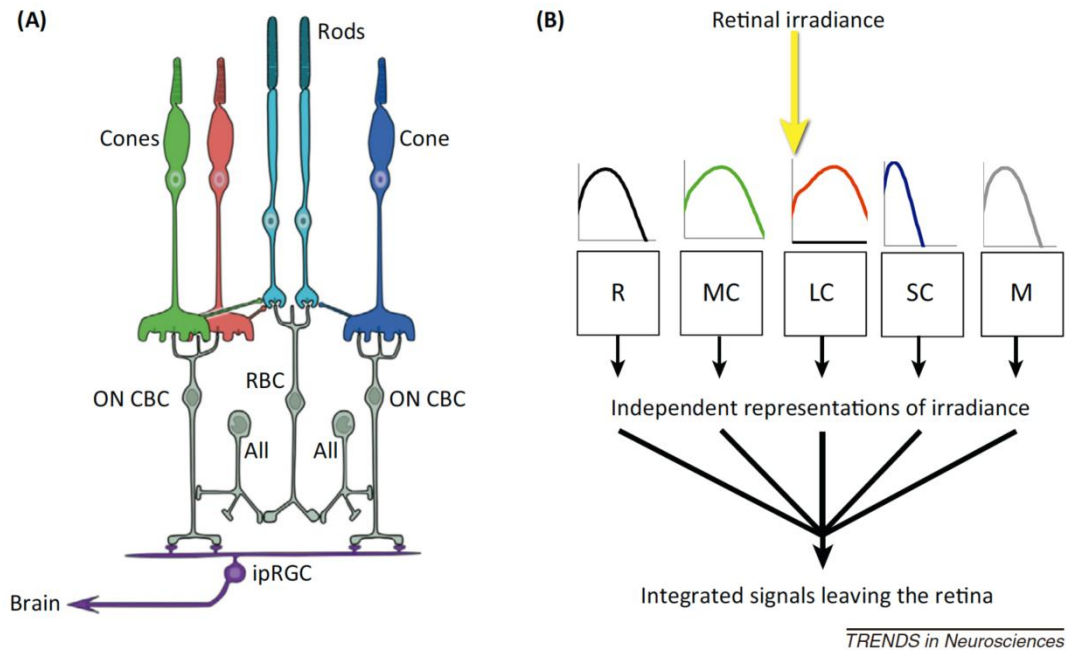


Figura 2.11 (a) Esquema dels circuits retinals més rellevants per les respostes circadiana, neuroendocrina i neurofuncional. CBC: Cel.lules bipolars dels cons, RBC: Cel.lules bipolars dels bastons, All: Cèl.lules amacrines. (b) Funció de sensibilitat individual de cada una de les diferents cèl.lules fotorreceptives: R (Rode opsin), M (melanopsin), SC (S cone opsin), MC (M cone opsine) i LC (L cone opsine). Cada una d'elles absorbeix la llum d'acord amb el seu propi espectre de sensibilitat.

La funció de sortida, o la resposta fotomètrica, per cada un del fotorreceptors vindrà donat per:

$$E_{\alpha}(\alpha, lx) = 72983.25 \sum E(\lambda) w_{\alpha}(\lambda) \Delta\lambda$$

$$\alpha : SC, M, MC, LC, R \quad (4)$$

amb: $\sum w_{\alpha}(\lambda) \Delta\lambda = 1$

La **figura 2.12** mostra les diferents funcions de pes $w_{\alpha}(\lambda)$ emprades, i la **taula 2.1** especifica la resposta fotomètrica de cada una de les cinc entrades fotorreceptives.

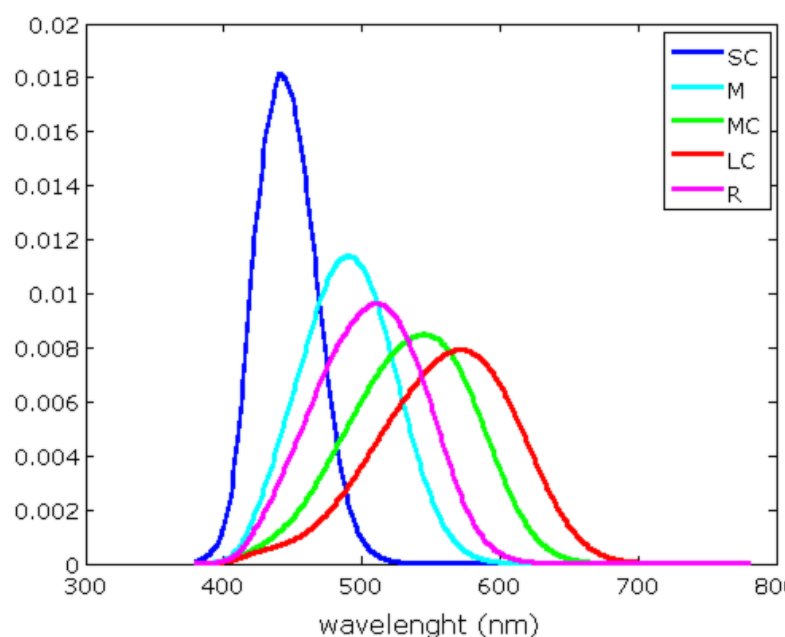


Figura 2.12 Funcions de pes o de sensibilitat espectral de les diferents opsines per determinar l'impacte circadià de la llum.

Taula 2.1. Resposta fotomètrica per cada una de les 5 entrades fotoreceptives del sistema circadià.

Fotoreceptor	Fotopigment (α)	Eficiència espectral α -opic, $N_{\alpha}(\lambda)$	Quantitat (il·luminació equivalent α -opic)	Símbol (E_{α})	Unitat (lux equivalents α -opic)	Símbol unitat
s-con	Fotopsina (sc)	<i>Cyanolabe</i>	<i>Cyanopic</i> il·luminació equivalent	E_{sc}	<i>Cyanopic</i> lux equivalents	sc-lx
m-con	Fotopsina (mc)	<i>Chlorolabe</i>	<i>Chloropic</i> il·luminació equivalent	E_{mc}	<i>Chloropic</i> lux equivalents	mc-lx
l-con	Fotopsina (lc)	<i>Erythrolabe</i>	<i>Erythropic</i> il·luminació equivalent	E_{lc}	<i>Erythropic</i> lux equivalents	lc-lx
IpRGC	Melanopsina (z)	<i>Melanopic</i>	<i>Melanopic</i> il·luminació equivalent	E_z	<i>Melanopic</i> lux equivalents	Mel-lx
Bastó	Escotopsina (r)	<i>Rhodopic</i>	<i>Rhodopic</i> il·luminació equivalent	E_r	<i>Rhodopic</i> lux equivalents	r-lx

En estudis realitzats fins ara, s'estableix un valor llindar orientatiu, que davant l'exposició del sistema visual a un estímul equivalent a 20 melanopic-luxdurant una hora, s'inhibeix la producció de melatonina en un 6%, començant a afectar ja el ritme circadià.

2.4. Protecció dels efectes nocius que produeix la llum blava

La percepció visual es produeix quan la llum incideix a la retina. Abans d'arribar a la retina, la llum incident ha de penetrar els mitjans oculars, els teixits transparents i els humors que es troben entre la part davantera de l'ull i la retina, els quals són la còrnia, l'humor aquós, el cristal·lí i l'humor vitri. Cadascuna d'aquestes parts de l'ull, absorbeix o transmet diferents longitududs d'ona.

Hi ha diferents tipus de filtres que tenen la funció d'evitar que la llum blava arribi a la retina amb la seva totalitat. Aquest filtres poden ser propis de l'organisme com el cristal·lí o el pigment macular de la retina, com també filtres externs inventats a mesura que s'han anat desenvolupant les noves tecnologies amb LEDs. A continuació descriurem aquests filtres.

2.4.1. Filtres interns

La protecció de l'ull contra les radiacions que hi incideixen, no només engloben la part blava del visible, sinó que també es veuen afectades per quasi tot l'espectre electromagnètic.

Gairebé tota la llum UV que arriba a l'ull és absorbida per la còrnia o el cristal·lí, de manera que en els ulls adults només 1% a 2% d'UV es transmet fins la retina. La còrnia, principalment, i el cristal·lí (mínimament) també bloquegen llum IR per sobre de 980 nm. El resultat net de filtració de la llum pels mitjans ocular, és que la retina s'exposa gairebé exclusivament a la porció visible de l'espectre electromagnètic (**figura 2.12**).

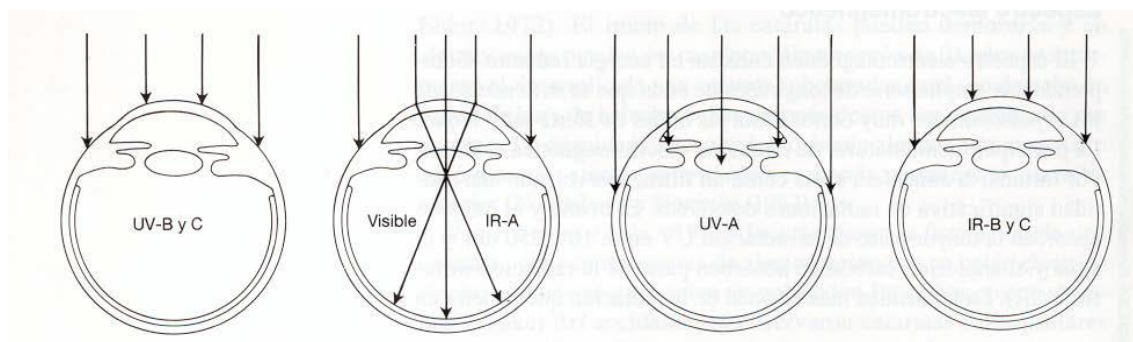


Figura 2.12. Transmissió electromagnètica per l'espectre compres entre l'UV i l'IR en els mitjans oculars.

La **taula 2.2** mostra la relació entre la radiació que incideix en la pupil·la, l'element que actua com a filtre i les possibles lesions que es produeixen per un excés de radiació.

Taula 2.2. Relació entre la radiació incident, l'element absorbent i les possibles lesions causades per un excés de radiació.

Radiació	Absorció	Lesions
UVC – UVB	Còrnia	Fotoqueratitis
UVA	Cristal·lí	Cataracta
VIS – IRA	Retina	Lesions retinals
IRB – IRC	Còrnia	Lesions corneals

En el cas de la llum blava, l'ull disposa dels seus propis filtres. Aquests filtres interns que protegeixen el sistema visual en front de les amenaces de la llum blava són el cristal·lí i el pigment macular.

2.4.1.1. Cristal·lí

El cristal·lí és una lent transparent i biconvexa, situada a la càmera posterior de l'ull, entre l'humor aquós i l'humor vitri. Es troba subjecte als processos ciliars mitjançant els lligaments de la zònula.

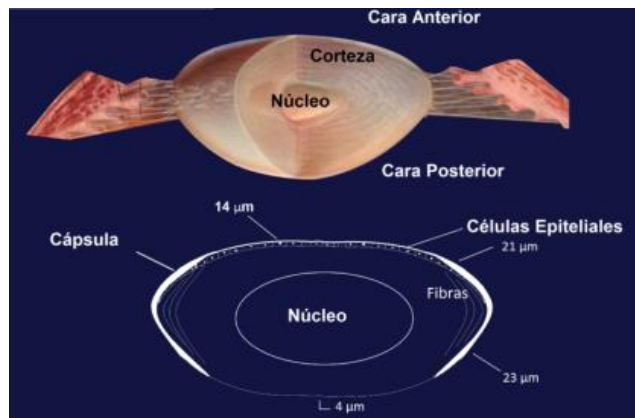


Figura 2.13. Estructura del cristal·lí.

El cristal·lí amb el temps es torna d'un color groguenc, el que anomenem cataracta, que és quan s'opacifica alguna de les seves parts o més d'una a l'hora (cataracta mixta). Realment quan el cristal·lí absorbeix més blau és quan hi ha una cataracta existent.

2.4.1.2. Pigment macular

El pigment macular està compost principalment per Luteïna i Zeaxantina. Com a característiques principals d'aquest pigment cal destacar:

- És un fort antioxidant que prevé el dany oxidatiu en la retina.
- Al tenir un aspecte groguenc filtre la llum blava.

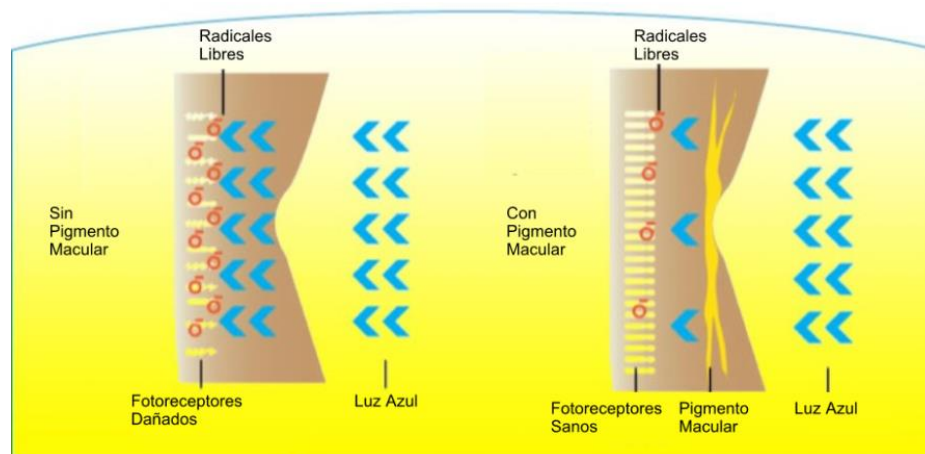


Figura 2.14. Afecció de la llum blava als fotorreceptors sense pigment macular i amb pigment macular.

Tot i l'efecte del filtre del pigment macular (**figura 2.14**) l'exposició prolongada a longituds d'ona curtes pot ajudar en el futur a la aparició de la DMAE (Degeneració macular deguda a l'edat). Aquesta és una malaltia macular que afecta a la AV (agudesia visual) central deixant només la visió perifèrica intacta. Es deu als canvis involutius per envelliment que afecten a la màcula en la retina externa, el EPR, la membrana de Bruch i la coriocapil·lar. És la causa més freqüent de pèrdua d'AV greu i irreversible en països occidentals en persones més grans de 60 anys. La seva prevalença augmenta amb l'edat, en majors de 75 anys el 30% està afectada en alguna porció.

Existeixen dos tipus de DMAE:

- DMAE Atròfica: Els seus símptomes són pèrdua gradual de la visió central, defectes en la Reixeta d'Amsler, distorsió de les imatges. Pot ser asimptomàtica. El seu signe més comú són les druses les quals poden variar en número, mida, forma i grau d'elevació.

- DMAE Exudativa: Els símptomes són distorsió de les línies rectes, escotomes en el camp visual central o paracentral i disminució ràpida de l'AV. Els signes més crítics són les druses i les hemorràgies subretinianes.

2.4.2. Filtres externs

Considerem la radiació d'una pantalla. La protecció ocular a aquesta radiació es pot fer mitjançant filtres software (inclosos en el dispositiu que conté la pantalla) i filtres hardware que actuen com a elements externs atenuadors (lents oftàlmiques i làmines absorbents).

2.4.2.1. Hardware

Entre els productes que s'engloben com a hardware trobem els filtres de làmines absorbents i els filtres incorporats en les lents oftàlmiques.

2.4.2.1.1. Filtres de làmines absorbent

Entre aquests filtres, el més coneguts són els de la marca Reticare (**figura 2.15**). Les làmines *Reticare* van ser dissenyades per el grup de la Dra. Sánchez Ramos de la Facultat d'Òptica i Optometria de la Universitat Complutense de Madrid, amb la finalitat d'atenuar els efecte tòxics de la llum blava.

Aquests tipus de filtres estan disponibles per a smartphones, tauletes i videoconsoles portàtils, però no per televisors, ja que es creu que la televisió es mira a una distància més gran i els efectes de la llum no són tan intensos com amb els altres dispositius. Es comercialitzen amb diferents nivells de protecció, baix, mitjà, alt i intens, en funció de l'edat de l'usuari i les hores d'ús del dispositiu.



Figura 2.15. Mostra d'una làmina *Reticare* per una tauleta gràfica.

2.4.2.1.2. Filtres en lents oftàlmiques

La quantitat de filtres d'aquest tipus és bastant ampli, ja que existeixen diferents fabricants de lents amb protecció envers la longitud d'ona curta que emeten les pantalles. L'objectiu bàsic d'aquestes lents és neutralitzar la llum blava, evitant la fatiga ocular i l'estrès visual.

Les cases comercials de lents més importants que tenen aquests filtres entre els seus productes són: *Essilor* amb el model "Crizal Prevencia" (**figura 2.16**), *Hoya* amb "Blue Control" i *Prats* amb les lents "CSR", que incorporen un filtre basat en el mateix principi que les làmines *Reticare* esmentades en el punt anterior.

Les seves característiques principals segons catàlegs és el bloqueig de la llum blava reduint així el percentatge de mort cel·lular, la protecció UV i la prevenció de la fatiga i l'estrès visual.



Figura 2.16. Diferència del reflex de la llum d'una lent amb tractament antireflexant i el model Crizal Prevencia.

2.4.2.2. Software

Els filtres de tipus software són els més accessibles, ja que tothom pot disposar d'ells en algun dels seus dispositius electrònics, i en moltes ocasions són lliures de cost. Aquests filtres, en el cas dels mòbils o de les tauletes, els podem tenir al nostre abast en la plataforma de distribució digital d'aplicacions, *Play Store* pel sistema operatiu *Android* i *App Store* pel sistema operatiu *iOS*. En aquestes plataformes interactives trobem diverses *apps* (de l'anglès *Applications*), les quals s'anuncien com a filtres per la llum blava nociva. Les tres *apps* més descarregades són *Twilight*, *Filtro luz azul* i *Blue Light Eyecare* (**figura 2.17**).

2.4.2.2.1. *Twilight*

Twilight és una aplicació gratuïta on tenim tres funcions diferents. La primera funció permet variar la temperatura de color des de 1000K fins a 5000K. Mitjançant la segona funció l'aplicació t'ofereix modificar la intensitat de la llum de la pantalla, on el percentatge mínim mostraria el color sense modificació aparent i el percentatge màxim ofereix una imatge on es potencien els tons blaus. La tercera funció varia l'atenuació de la pantalla, és a dir, podem controlar si volem més brillantor o menys (**figura 2.17a**).

També podem escollir si activar aquest filtre manualment, és a dir, poder variar per nosaltres mateixos els tres paràmetres comentats abans, o si volem que el filtre s'activi automàticament amb la posta i sortida del sol, si volem posar l'horari propi per adaptar-ho a la nostra rutina, o si necessitem que ens avisi quan hauríem d'activar el filtre.

2.4.2.2.2. *Filtro luz azul*

Aquesta aplicació és més senzilla que el *Twilight*. La diferència principal amb aquesta és que pots aplicar set tipus diferents de filtres: gris, marró, vermell, taronja, groc i dos tipus de verds. En tots ells es pot modificar el percentatge del filtre aplicat des de 0% fins al 80% (**figura 2.17b**). En aquesta *app* l'inconvenient que trobem és que no es pot posar en mode automàtic i no es pot saber quina temperatura de color té el filtre seleccionat.

2.4.2.2.3. *Blue Light Eyecare*

El següent filtre és el *Blue Light Eyecare* el qual és molt semblant al *Filtro luz azul* anterior. Tampoc es pot posar en mode automàtic, però podem seleccionar diferents filtres de colors: dos tons de grisos, groc, vermell i blau. Es pot modificar tant la intensitat dels filtres, amb una escala que va des de el 0% fins al 100% d'aplicació, com la brillantor de la pantalla (**figura 2.17c**).

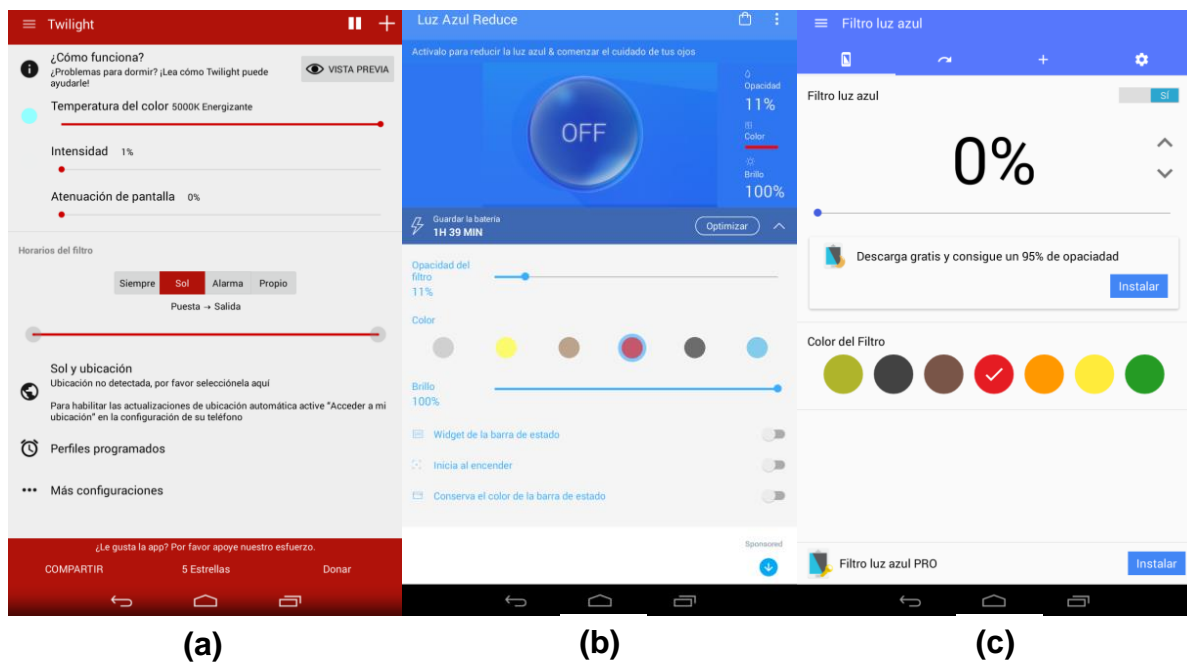


Figura 2.17. Pantalles principals de la *apps* més descarregades del Sistema Android: (a) *Twilight*, (b) *Blue Light Eyecare* i (c) *Filtro luz azul*.

2.4.2.2.4. Nigth Shift

En el cas del sistema operatiu *IOS*, existeix una opció de configuració de la pantalla i la seva brillantor incorporada per defecte en la versió més moderna del sistema operatiu (**figura 2.18**). Segons el seu fabricant “canvia automàticament els colors de la pantalla a una gamma més càlida quan es fa de nit, la qual cosa t’ajuda a tenir un son més reparador”.



Figura 2.18. Configuració del *Nigth Shift* del sistema operatiu *IOS*.

2.4.2.2.5. *f.lux*

L' *f.lux* és l'aplicació possiblement més utilitzada per a ordinador (**figura 2.19**). Existeix tant la versió per *Windows* com per *Mac*. Segons la pàgina web de descarrega, “és una aplicació que fa que dormim millor a causa de l'atenuació de la pantalla a una gama de colors més càlids”.

A l'aplicació que descarreguem a l'ordinador podem escollir si volem que s'apliqui el filtre automàticament un cop encenem l'ordinador. Per això cal posar la localització del PC per tal que identifiqui l'ús horari en el que ens trobem. També és possible modificar manualment l'acció del filtre mitjançant dues escales, la del dia i la de la nit. D'aquesta manera es pot posar el filtre al màxim d'atenuació a 2700K o al mínim de la seva acció a 6500K (simulació de la llum del dia, la qual és equivalent a no aplicar cap filtre). Com a referència del color que simula la pantalla surten 3 tipus de llums: incandescent a 2700K, halògena a 3400K i llum del dia a 6500K.

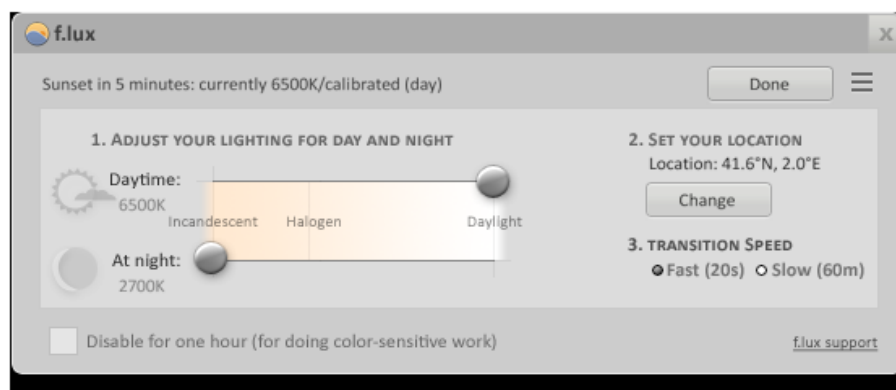


Figura 2.19. Aplicació *f.lux* per *Windows*.

2.4.2.3. Recomanacions per a disminuir l'efecte de les pantalles

Tots aquests filtres ajuden a evitar la fatiga visual i atenuar la transmissió de llum blava a la retina. L'acció d'aquests filtres no és suficient per tenir una correcta salut visual. Molts fabricants ofereixen consells i solucions per tal de mantenir la millor salut visual:

1. Procurar que l'altura de la cadira i de la taula estiguin de forma que permetin mantenir la planta d'ambdós peus recolzada totalment sobre el terra, el cos recte i l'espatlla lleugerament enrere, per tal de que els ulls quedin situats a la mateixa distància de treball.

2. Tenir una bona il·luminació ambiental i evitar tot tipus de reflexes sobre la pantalla.
3. Evitar que els ulls rebin directament la llum de les làmpades utilitzades per il·luminar la taula.
4. Aplicar la regla del 20-20-20, cada 20 minuts apartar la mirada de la pantalla, durant 20 segons a una distància de 20 peus (6 metres).
5. No s'ha de llegir amb el cap, sinó amb els ulls. Si es llegeix amb el cap pot ser signe d'un problema visual.

3. Objectius i hipòtesis

Els objectius a assolir en aquest treball són:

- Demostrar experimentalment com les pantalles LED d'alguns dispositius electrònics tenen un pic d'emissió en la franja dels blaus/violats.
- Comparar l'emissió de les pantalles de diferents dispositius, en funció de la mida de cada una d'elles.
- Determinar quins filtres de llum blava per software existeixen en el mercat de les *apps*, per a diferents sistemes operatius (*Android*, *IOS* i *Windows*), i conèixer quins paràmetres permeten controlar en cada cas.
- Realitzar mesures experimentals per determinar l'efecte dels paràmetres de control de les aplicacions escollides sobre l'emissió de les pantalles.
- Realitzar una comparació dels resultats obtinguts per les diferents aplicacions analitzades per un mateix dispositiu, quan hi ha més d'una aplicació, i també pels diferents dispositius analitzats.
- Conèixer l'espectre d'emissió de les pantalles quan aquestes presenten imatges quotidianes.
- Comprovar com afecten els paràmetres de control del filtre aplicat en l'alteració del color de les imatges.
- Comparar l'efecte dels filtres de les *apps* envers els filtres hardware que es comercialitzen, en particular làmines *Reticare* i filtres en lents oftàlmiques.

A partir d'aquests objectius s'ha plantejat la següent hipòtesis:

- Les aplicacions per al control de la llum blava dels dispositius electrònics filtren una part de la radiació emesa per la pantalla en la banda de longituds d'ona curta.

4. Metodologia

4.1. Material

4.1.1. Dispositius electrònics analitzats i els seus sistemes d'il·luminació

Per a realitzar les mesures es van utilitzar diferents pantalles retro-il·luminades per tecnologia LED. Cada una d'elles corresponia a un dispositiu diferent, en concret: una tauleta *Acer* amb sistema operatiu *Android*, un mòbil model *Iphone 5s*, i finalment un ordinador portàtil *Asus* model *F555L*. Per cada dispositiu, es va fer una cerca a internet per saber les aplicacions disponibles en cada cas. En la següent taula s'especifiquen els models corresponents a cada dispositiu, així com el sistema operatiu utilitzat, i les *apps* analitzades.

- Dispositius amb il·luminació LED utilitzats a l'estudi:

Dispositiu	Sistema Operatiu	Apps
Tauleta <i>Acer Inconia One 7</i> (Figura 4.1)	<i>Android</i>	<i>Twilight</i> , <i>Filtro luz azul</i> i <i>Blue Light Eyecare</i>
Mòbil <i>Iphone 5s</i> (Figura 4.2)	<i>IOS</i>	<i>Nigth Shift</i>
Ordinador <i>Asus F555L</i> (Figura 4.3)	<i>Windows</i>	<i>f.lux</i>

Per a la comparació dels filtres per software amb els filtres hardware (làmines *Reticare* i filtres en lents oftàlmiques) es va utilitzar com a pantalla retro-il·luminada, la del ordinador portàtil *Asus F555L*.



Figura 4.1. Tauleta *Acer Inconia One 7*.



Figura 4.2. Mòbil *Iphone 5s*.



Figura 4.3. Ordinador portàtil Asus F555L.

Tots els aparells electrònics utilitzats tenen en comú un sistema de retro-il·luminació similar. En concret utilitzen una matriu de LEDs RGB, que ocupa tot el darrera de la pantalla LCD com correspon a una il·luminació directa. En el cas de la tauleta, i a tall d'exemple, es va capturar al laboratori una imatge a través d'un microscopi quan a la pantalla es mostrava una imatge totalment blanca al màxim d'il·luminació. La **figura 4.4** mostra la imatge enregistrada a 5x augments. En ella s'observen en primer lloc la matriu regular de LEDs de tres colors, RGB, i com, en el cas de mostrar una imatge blanca, tots ells es troben en funcionament al màxim de la seva intensitat. És la combinació de la llum de la triada de LEDs que permet visualitzar un color blanc a la pantalla.

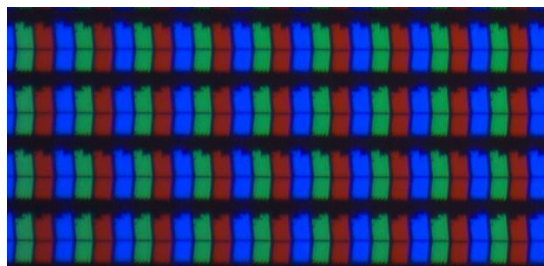


Figura 4.4. Matriu de LEDs de la tauleta Acer obtinguda amb un microscopi a 5x augments, quan aquesta mostra una imatge uniforme blanca a la màxima intensitat.

A l'analitzar l'emissió de les pantalles estudiades, es va considerar les mateixes condicions en totes les mesures: els aparells electrònics tenien la il·luminació de la pantalla al màxim permès pel dispositiu, i en ella es mostrava una imatge blanca uniforme. En aquestes condicions asseguràvem que la radiació analitzada corresponia a la màxima emissió possible del conjunt de LEDs RGB. En tots els casos, la il·luminació del laboratori es va apagar mentre

es feien les mesures per evitar llums paràsites i tenir com a única font d'emissió la de les pantalles.

4.1.2. Espectroradiòmetre. Mesures radiomètriques i fotomètriques.

Per tal de realitzar les mesures radiomètriques es va utilitzar un espectroradiòmetre de la casa "Photo Research" model PR-715. El muntatge per fer les mesures es mostra en la **figura 4.5**. En aquesta imatge es pot observar la subjecció de l'espectroradiòmetre mitjançant un trípode. D'aquesta manera, variant la inclinació de l'aparell de mesura s'assegurar que el sensor queda situat paral·lel a la pantalla analitzada. La inclinació de la pantalla del portàtil ens facilita aquesta configuració de manera directa, mentre que en el cas del mòbil i la tauleta es va utilitzar un suport per subjectar-los amb la inclinació adient, amb la pantalla sempre paral·lela al sensor de l'espectroradiòmetre.

En totes les mesures es considera una distància fixa de 40cm entre el sensor i la pantalla. Es pren aquesta distància com un valor general d'observació dels dispositius electrònics, tot i que en el cas del mòbil, amb una pantalla de dimensions més reduïdes, la seva visualització es pot realitzar a una distància més curta.

El programa *SpectraWin* en un ordinador connectat al espectroradiòmetre, ens permet obtenir i registrar les mesures realitzades per l'aparell per al seu posterior anàlisi. Aquest software informàtic permet obtenir les dades numèriques de la irradiància espectral d'una font de llum i altres paràmetres radiomètrics, fotomètrics i colorimètrics. L'espectroradiòmetre proporciona mesures espectrals entre les longituds d'ona de 380 nm i els 1068nm, amb un pas de 4nm. En el nostre cas, restringim les mesures en el rang visible entre 380 i 780nm, per analitzar l'efecte dels filtres blaus en aquesta regió de l'espectre.

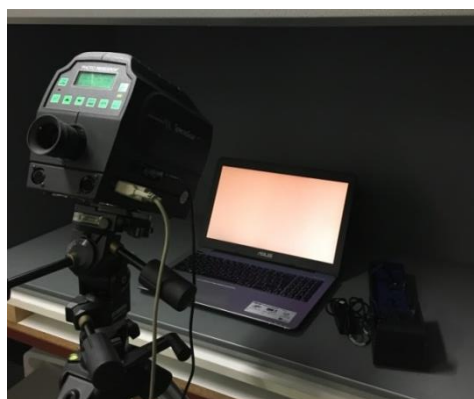


Figura 4.5. Muntatge de l'espectroradiòmetre *Photo Research PR-715* davant del portàtil *Asus F555L* quan aquest mostrava una imatge blanca uniforme.

4.2. Mètode

En totes les mesures, es mantenia la distància entre l'espectroradiòmetre i la pantalla a 40cm. Es mostrava una imatge uniforme blanca i es mantenia la lluminositat de la pantalla a la màxima intensitat. Cada aplicació analitzada té uns paràmetres de control, en general diferents entre elles. En tots els casos, es va comprovar quins valors dels paràmetres corresponien a no aplicar cap filtre de llum blava o a desactivar l'aplicació.

En aquest apartat descrivim breument els paràmetres que es van modificar per cada aplicació i dispositiu.

4.2.1. Descripció dels paràmetres de control de les aplicacions *Android*

4.2.2.1. *Twilight*

En la **figura 2.18a** s'ha mostrat una imatge de la pantalla d'activació d'aquest software. Per aquesta aplicació, es va posar l'atenuació de la pantalla al 0% (equivalent a no tenir cap filtre), la intensitat de la brillantor al màxim. El paràmetre que es va era la temperatura de color (Tc). Es van fer cinc mesures variant la Tc de 5000K, 4100K, 3400K, 2700K i 1000K sobre una imatge blanca. També es va desactivar l'aplicació per tenir una referència del blanc quan no estava afectat de cap filtre.

4.2.1.3. *Filtro luz azul*

L' *app* Filtre de llum blava **figura 2.18b** de filtratge, permet escollir filtres de diferents colors, i tons de gris. Per un filtre concret, es pot modificar el percentatge de filtrat que s'aplica a la pantalla. Es van fer diverses mesures sobre dos tipus de filtre, el groc i un gris. Sobre cada filtre es van fer quatre mesures de 20%, 40%, 60% i 80% de filtrat sobre la pantalla, com també la mesura de referència del 0%.

4.2.1.2. *Blue Light Eyecare*

Aquest software mostrat en la **figura 2.18c** té com a paràmetre a variar l'opacitat del filtre que s'aplica sobre la pantalla. Es va posar la brillantor de la pantalla al màxim i es van fer les mesures sobre cinc percentatges d'opacitat de filtre, en concret el 20%, 40%, 60%, 80% i 100%. Per tal de tenir una referència, es va fer una mesura sobre el 0% d'opacitat del filtratge de llum blava i saber si actua realment sobre el mínim permès per la *app*.

4.2.2. Descripció de l'app per mòbils amb sistema operatiu *IOS*.

4.2.2.1 *Night Shift*

Aquesta aplicació permet variar sobre una botó de desplaçament la temperatura de color (**figura 2.20**). En concret es van escollir els valors del 0% de filtre (que correspon a temperatures de color menys càlides), el 50% i el 100% (que correspon a temperatures de color més càlides). Es van escollir aquests percentatges davant la dificultat d'ajustar altres valors intermitjos sobre un desplaçament que no està graduat.

4.2.3. Descripció de l'app per ordinador.

4.2.3.1 *f.lux*

L'aplicació *f.lux* està disponible tant pel sistema operatiu *Windows* com per *IOS*. En el nostre cas es va instal·lar en un ordinador portàtil amb *Windows*. L'aplicació permet modificar la temperatura de color del filtre aplicat entre els valors 6500K, 5000K, 4100K, 3400K i 2700K. També es va comprovar, com amb les anteriors, si les mesures obtingudes per la *Tc* de 6500K coincidien amb les mesures d'una imatge blanca sense cap filtre activat.

4.2.4. Làmines *Reticare*

Les làmines *Reticare* disponibles per fer la mesura, tenen unes dimensions diferents a totes les pantalles utilitzades per analitzar les aplicacions de software. Per aquest motiu es va optar per utilitzar l'ordinador portàtil *Asus* anterior i es va adaptar la mida de la pantalla a l'àrea dels filtres *Reticare*. Mitjançant unes cartolines negres que tapaven les vores de la pantalla es va deixar lliure rectangle vertical de 17,5cm x 19,5 cm, en comptes dels 34 cm d'amplà per 19,5 cm d'alçada que fa realment la pantalla.

En les mesures s'han utilitzat tres làmines diferents de *Reticare*, amb diferent grau d'atenuació: Intens, Alt i Mitjà. Les làmines s'han posat sobre la pantalla del portàtil. En totes les mesures s'ha posat un fons blanc uniforme a la pantalla de l'ordinador, i s'ha pres com a mesura de referència la pantalla retallada amb les cartolines sense cap filtre *Reticare* afegit.

4.2.5. Filtres en lents oftàlmiques

Utilitzant novament com a font de llum l'ordinador portàtil amb la pantalla semi-coberta per la cartolina negra, s'han analitzat les diferents lents oftàlmiques amb filtre blau disponibles. Sobre el sensor de l'espectroradiòmetre, de manera similar a com estarien muntats en una muntura oftàlmica, es van superposar les lents dels diferents fabricants amb la cara convexa cap a la pantalla, per tal de que simuli més l'efecte de les ulleres sobre el sistema visual. Gairebé totes les lents utilitzades eren neutres per tal de que la potència de la lent no influís en la mesura de la llum. Es van analitzar les lents de *Prats*, *Hoya* i *Essilor*.

4.3. Implicacions ètiques

El treball realitzat és un treball estrictament de laboratori sense la participació de pacients ni usuaris.

Els autors del treball no tenen cap interès comercial en les cases dels fabricants de les aplicacions, làmines *Reticare* i lents oftàlmiques analitzades com a mostres.

5. Resultats i discussió

A continuació es mostraran els resultats obtinguts al laboratori de les corbes d'irradiància espectral mesurades amb l'espectroradiòmetre *Photo Research PR-715*. S'agruparan segons el dispositiu electrònic, i en el cas de la tauleta, s'oferiran els resultats per a les tres aplicacions analitzades.

L'espectroradiòmetre també ens ofereix les coordenades cromàtiques xy CIELAB 1931 per a cada mesura, amb les que presentarem sobre el diagrama de color CIELAB, el punt corresponent a cada mesura que indicarà l'apreciació de color que tindria un observador patró. D'aquesta manera es posarà de manifest l'alteració del color que poden introduir aquests filtres de llum blava.

En tercer lloc, i per cada dispositiu i aplicació, també es compararà la resposta a la radiació dels cinc fotoreceptors retinians (α -opic lux) comptant la irradiància espectral que arribaria a la còrnia d'un observador situat a 40 cm de la pantalla. En el mateix gràfic de barres s'introduirà la mesura dels lux totals rebuts per la pantalla quan aquesta no té aplicat cap filtre.

Es començarà donant els resultats de les aplicacions analitzades d'*Android* en la tauleta *Acer Inconia One 7*, després amb la configuració de pantalla que permet reduir la llum blava de *IOS* en un *Iphone 5s* i seguidament, en un ordinador *Asus F555L*, avaluarem el programa *f.lux*, per comparar-lo amb filtres hardware com són les làmines *Reticare* i alguns filtres blaus de lents oftàlmiques.

5.1. *Twilight*

A continuació s'analitza l'app *Twilight* per sistema operatiu *Android*. La corba d'irradiància espectral obtinguda per l'espectroradiòmetre és la que es mostra a la **figura 5.1**. En aquesta figura es mostra el valor de la irradiància mesurada en unitats del sistema internacional ($\text{W}/\text{m}^2\text{nm}$) en funció de la longitud d'ona (en nm) dins el rang de l'espectre visible (380-780 nm).

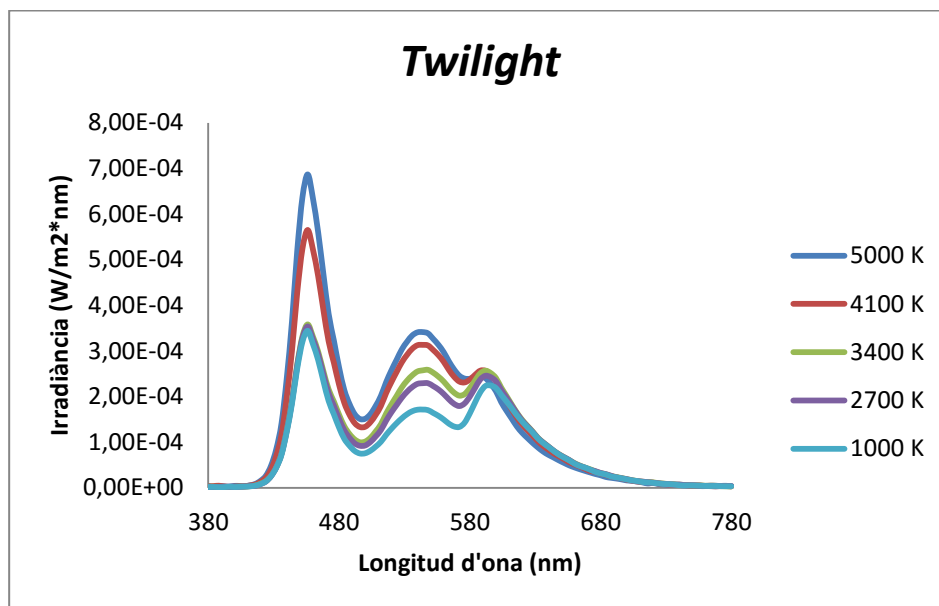


Figura 5.1. Corba d'irradiància en el visible de la *app Twilight* en funció de diferents Temperatures de color del filtre aplicat.

La **figura 5.1.** mostra 5 corbes les quals estan representades en funció de la temperatura de color (T_c) del filtre aplicat. En primer lloc cal destacar la forma de l'espectre d'emissió d'aquesta pantalla, quan no hi ha cap filtre aplicat, que es repetirà en els diferents dispositius. Si ens fixem amb la corba de 5000 K, equivalent a no aplicar el filtre en aquesta *app*, veiem com és l'espectre d'emissió del sistema de retro-il·luminació per LEDs RGB. Aquest té una corba amb tres pics diferenciats corresponents a l'emissió de la triada de LEDs: un pic en la regió dels blaus, un altre en els verds, i finalment un tercer, menys intens, en els vermells. És important remarcar, com ja s'ha dit en aquest treball anteriorment, el màxim pic d'emissió localitzat als 456nm, en la zona dels blaus, ben característic de les pantalles il·luminades per LEDs blancs.

En el gràfic, observem que al disminuir la T_c , equivalent a emprar fonts de llum més càlides, s'observa una clara disminució de la irradiància en la zona dels blaus i verds de l'espectre, mentre que els vermells mantenen valors similars. Centrant-nos en les longituds d'ona curta, l'atenuació dels blaus és del 18% amb una T_c de 4100K, un 47% amb una T_c de 3400K, un 48% amb una T_c de 2700K i un 50 % amb una T_c de 1000K. Veient aquest resultat, es pot dir que a partir de 3400K s'assoleix un valor màxim d'atenuació de longituds d'ona blava, proper al 50%.

Per altra banda, observem que per a totes les T_c del filtre, s'obté un espectre amb un pic en la zona dels blaus (456nm), el màxim del qual va disminuint a mesura que disminueix la T_c . Això significa que encara que apliquem el màxim de filtre, la irradiància emesa per la pantalla sempre manté un pic d'emissió en els blaus. Una altra cosa que es pot veure és que la franja dels verds (495 – 570nm) queda afectada com més filtre aplicat, però la dels vermells no gaire, això fa que els colors siguin més càlids amb T_c baixes.

El problema d'aplicar un filtre que modifica la distribució de l'energia en l'espectre visible, és que el color d'una imatge representada en aquesta pantalla es percep alterat. Una manera de posar de manifest aquest fet, és veure les coordenades xy del sistema CIELAB 1931 que ens proporciona el mateix espectroradiòmetre. La **figura 5.2.** mostra un gràfic de coordenades cromàtiques xy CIELAB 1931. Aquest gràfic ens permet representar sobre el diagrama CIELAB de color, els valors de la coordenada x en l'eix d'abscisses, i la coordenada y en l'eix d'ordenades. Gràcies a la representació en colors d'aquest gràfic podem veure sobre quina tonalitat apareix els valors obtinguts en cada mesura corresponent a un valor d'aplicació del filtre. Per tenir una referència, les coordenades de la temperatura de color del blanc són $x=0,33$ i $y=0,33$.

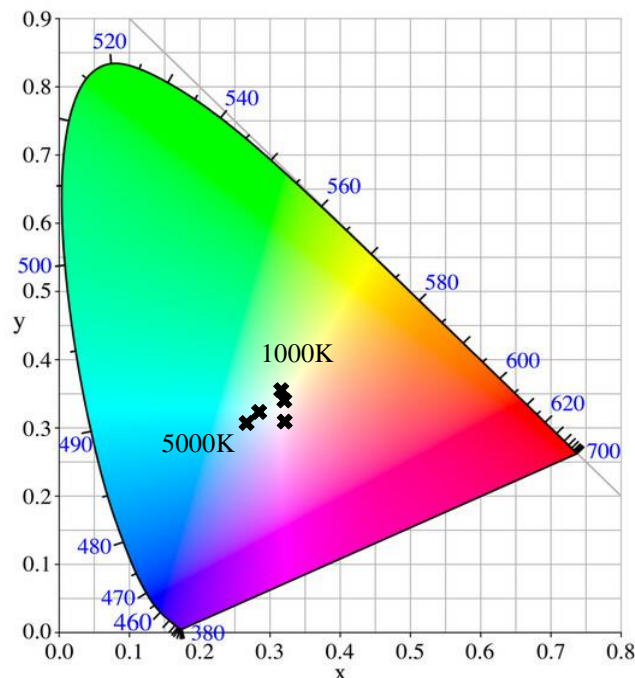


Figura 5.2. Coordenades cromàtiques xy CIELAB per les diferents T_c del filtre aplicat en el software *Twilight*.

A la **figura 5.2.** podem observar com per diferents Tc del filtre aplicat, el color percebut de la pantalla que mostra una imatge uniforme blanca varia de manera apreciable. Per Tc altes (5000K) s'obté un color més fred cap a tonalitats blavoses, mentres que a l'altre extrem, per Tc baixes (1000K) s'obté un blanc més càlid. La progressió però d'aquesta variació de color, no és lineal amb la variació de Tc. Això pot ser degut a la variació no uniforme de l'espectre que produeix l'aplicació d'aquest filtre.

La **figura 5.3.** mostra la resposta dels fotoreceptors visuals a la llum emesa per la pantalla. En l'eix d'abscisses trobem la resposta dels tres tipus de cons (cyanopic, chlorotopic i erythropic), dels bastons (rhodotopic) i de les cèl·lules ipRGC amb melanopsina (melanopic) i en l'eix de coordenades els valors d' α -opic lux. La darrera columna del gràfic correspon a la mesura dels lux totals que arribarien a la còrnia situada a 40cm degut a l'emissió de la pantalla. Com s'ha comentat en l'apartat de mesura circadiana del marc teòric, s'ha establert el criteri pel qual l'exposició a un estímul equivalent a 20 melanopic-lux (Mel-lux) durant una hora, inhibeix la producció de melatonina en un 6%, començant a afectar el ritme circadià.

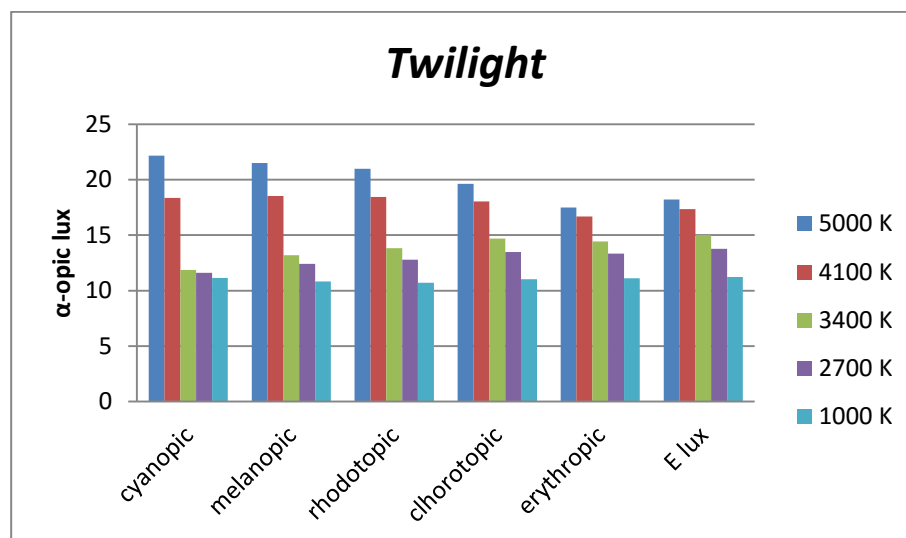


Figura 5.3. Reacció dels fotoreceptors a la llum emesa per la pantalla en l'app *Twilight*.

Si ens fixem en la **figura 5.3.**, en la columna de melanopic-lux amb una Tc de 5000K (equivalent a no aplicar el filtre blau) veiem que es troba lleugerament per sobre dels 20 Mel-lux, implicant que si ens exposem a la llum d'aquesta tauleta durant una hora a la nit, s'inhibirà un percentatge aproximat lleugerament superior al 6% de la producció de melatonina, endarrerint en certa mesura la sensació de cansament i de necessitat de dormir. Per altra banda, veiem que si apliquem el filtre d'aquesta aplicació, per exemple Tc=4100K, el

valor de resposta de les cèl·lules ipRGC decau per sota dels 20 Mel-lux, i amb $T_c=3400K$ o inferiors, la resposta ja és clarament inferior als 15 Mel-lux, reduint així de manera clara l'alteració del ritme circadià.

Finalment esmentem que la il·luminació de la còrnia per la pantalla de la tauleta que té unes dimensions de 95 x 151 mm sense cap filtre aplicat seria d'uns 19 lux, mentre que amb la màxima atenuació del filtre al valor de 1000 K, la il·luminació seria d'uns 11 lux.

5.2. Filtro luz azul

Aquesta aplicació permet seleccionar entre diversos colors de filtres, o el que seria equivalent diferents temperatures de color. Entre tots els disponibles es va analitzar el de color groc i a continuació un gris.

5.2.1. Filtre Groc

La corba d'irradiància espectral del filtre groc d'aquesta *app* es mostra a la **figura 5.4**.

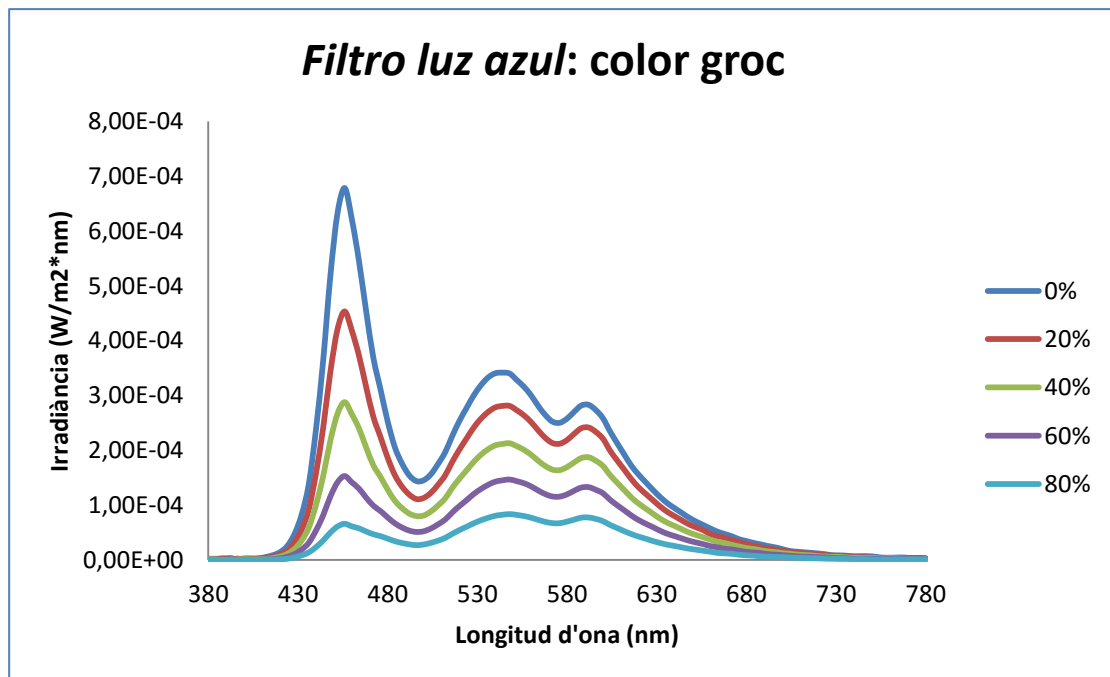


Figura 5.4. Corba d'irradiància espectral en el visible de la *app Filtro luz azul* amb un filtre groc en funció de diferents percentatges d'atenuació del filtre.

La **figura 5.4.** ens mostra cinc corbes amb diferent percentatge d'atenuació del filtre, on la mínima és 0% (sense filtre) i la màxima permesa per l'app és del 80%. Observem, que l'efecte d'augmentar el percentatge d'atenuació del filtre, provoca una disminució de la irradiància pràcticament en totes les longituds d'ona de l'espectre visible, sent una mica més acusada en la zona dels blaus. A més percentatge d'atenuació del filtre aplicat, més s'atenua la irradiància en la franja dels blaus. En concret, el pic de 456nm s'atenua un 33% amb el filtre anomenat per l'aplicació del 20%, La disminució és d'un 58%, un 78% i d'un 88% amb el filtre del 40%, del 60% i del 80%, respectivament. Això fa a entendre que els percentatges que dona l'app són només una referència, però no coincideixen exactament amb l'atenuació mesurada del blau.

El pic blau es manté el més intens en tots els percentatges, excepte en el cas del filtre de 80%, on la irradiància en els verds i en els taronges-vermells, supera lleugerament els valors obtinguts en la regió dels blaus. En aquest cas concret, els pics més intensos s'obtenen a 548nm (verds) i a 592nm (taronges-vermells). Com a conseqüència de l'aplicació del filtre la percepció del color queda afectada com es pot veure en les coordenades cromàtiques de la **figura 5.5.**

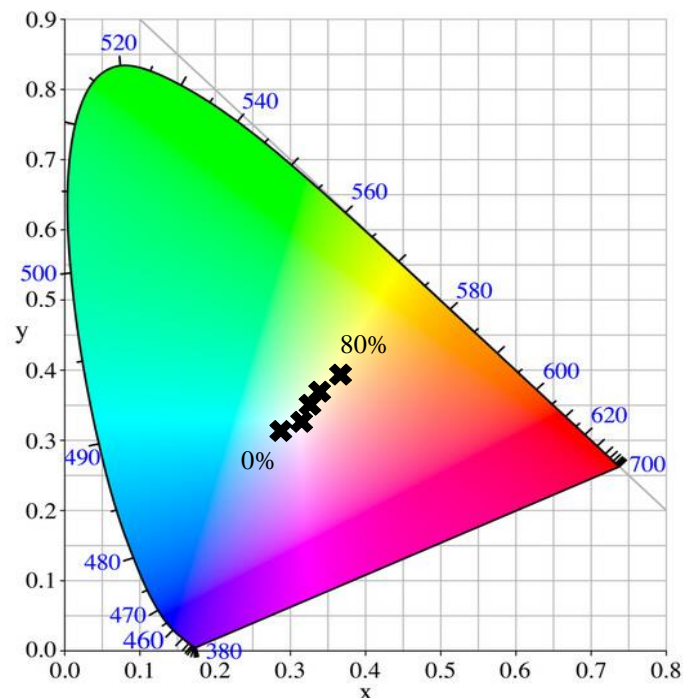


Figura 5.5. Coordenades cromàtiques a l'espai CIELAB 1931 del *Filtro luz azul* seleccionant el filtre Groc.

En la **figura 5.5.** s'observa com hi ha una variació de color a mesura que anem augmentat el percentatge d'atenuació del filtre. Això fa que el color de la pantalla, on es reproduïx una imatge uniforme blanca, passi del blanc més fred inicial cap a un color d'una gama més càlida, amb una tonalitat groga, com el nom del filtre ens feia preveure.

A la **figura 5.6.** es mostren les respostes dels fotoreceptors visuals. En primer lloc comentar que la resposta dels fotoreceptors quan no hi ha cap filtre aplicat (corresponent al 0% d'atenuació del filtre) és la mateixa que en l'app *Twilight* ($T_c=5000K$) de la **figura 5.3**, ja que s'utilitza el mateix dispositiu electrònic, per tant en el cas del 0% del filtre la columna de Mel-lux es troba per sobre del llindar de 20 Mel-lux, que indica que hi haurà una inhibició de producció de melatonina d'un 6% després d'una hora d'exposició nocturna. Pels altres percentatges d'atenuació del filtre, veiem que hi ha una disminució progressiva i important dels Mel-lux, sempre per sota del llindar dels 20 Mel-lux.

En aquest cas, la il·luminació que arriba a la còrnia sense cap filtre és d'uns 19 lux i amb el filtre de 80% és d'uns 4 lux.

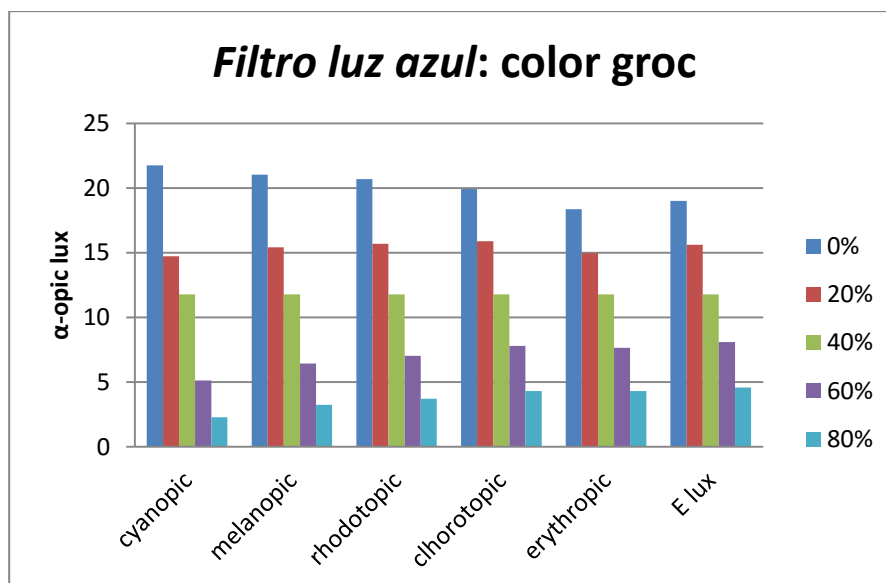


Figura 5.6. Reacció dels fotoreceptors a la llum emesa per la tauleta Acer amb l'app *Filtro luz azul*, seleccionant el filtre Groc.

5.2.2. Filtre Gris

A continuació s'analitza en la mateixa aplicació un segon filtre dins les opcions disponibles, en concret el filtre gris.

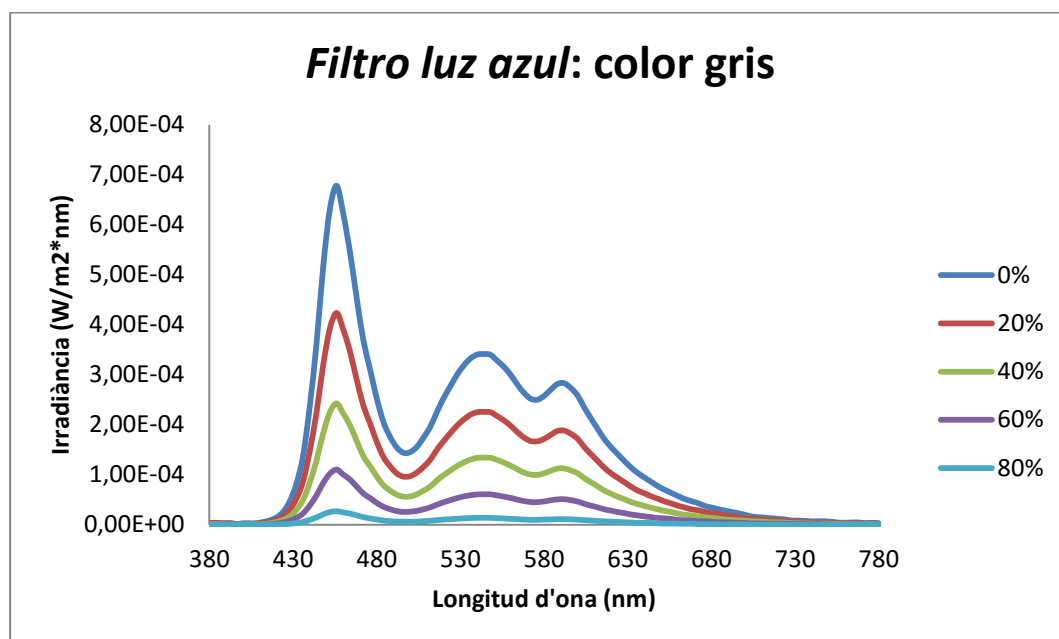


Figura 5.7. Corba d'irradiància en el visible de la *app Filtro luz azul* amb un filtre gris en funció de diferents percentatges de filtre.

En la **figura 5.7.** es mostren les corbes que dona l'aplicació *Filtro luz azul* amb un filtre gris. A l'incrementar el percentatge d'atenuació del filtre gris, s'observa una reducció important de la irradiància en tot l'espectre visible. En aquest cas, s'observa que el màxim d'emissió sempre es troba en la longitud d'ona blava, obtenint un pic 456nm.

El percentatge de reducció de la llum blava és del 38% en el filtre del 20%, amb el filtre del 40% hi ha una reducció del 64%, amb el 60% una de 84% i amb el 80% s'aplica una reducció del 96%. Aquest percentatges, com amb el filtre d'abans, són d'ajuda perquè els usuaris vegin aproximadament el percentatge d'atenuació del filtre que hi ha aplicat.

Aquest tipus de filtre no es pot dir realment que serveixi per reduir el blau davant les altres longituds d'ona, sinó que afecta per un igual a tot l'espectre visible. A la **figura 5.8.** es pot veure com el filtre no afecta gaire a la percepció del color, mantenint sempre les coordenades xy CIELAB en una zona propera al blanc de referència ($x=0,33$ i $y=0,33$). Això és així perquè el filtre no ha afectat gaire a coordenades cromàtiques del color blanc representat a la pantalla, sinó a la seva intensitat.

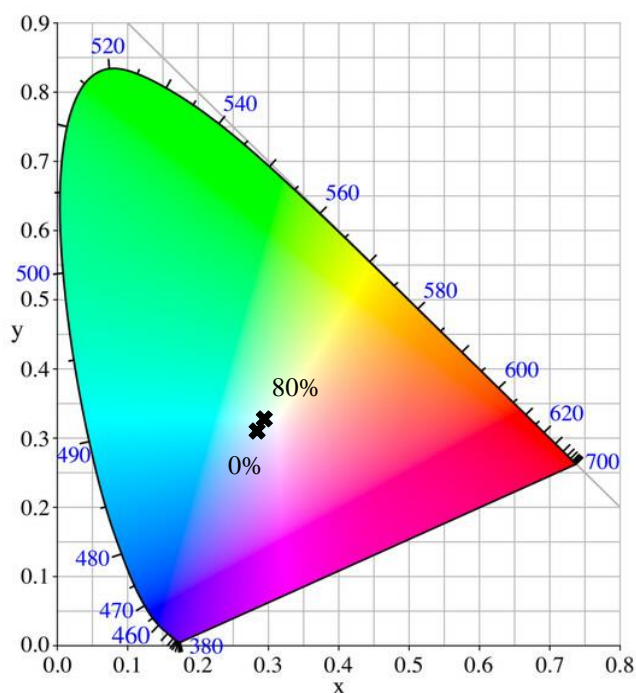


Figura 5.8. Coordenades cromàtiques a l'espai CIELAB 1931 del *Filtro luz azul* de color Gris.

En el cas de la resposta dels fotoreceptors (**figura 5.9**), com la tauleta és la mateixa només es supera el llindar d'inhibició en el cas de l'app sense filtre i en la resta de columnes els α -opic lux es troben per sota de 15 lux. Una diferència remarcable és que la tauleta sense filtre emet uns 19 lux i amb el màxim d'atenuació (80%) emet només 1 lux.

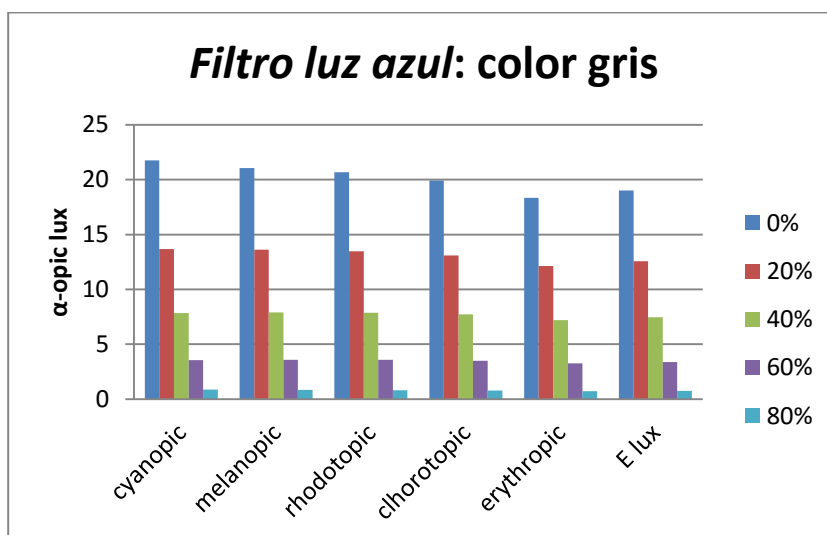


Figura 5.9. Resposta dels fotoreceptors a la llum emesa per la pantalla en l'app *Filtro luz azul* Gris.

Si comparem els resultats obtinguts amb els dos colors del filtre estudiats d'aquesta aplicació (groc i gris), es pot observar com el filtre groc afecta de forma diferent a les longituds d'ona del visible, atenuant més la franja dels blaus, mentre que el filtre gris, les afecta de manera més semblant. Així, podem dir que el filtre gris no s'altera de manera significativa els colors de la pantalla, però redueix dràsticament l'energia total emesa pel dispositiu, dels 19 lux que emetia la pantalla sense cap filtre fins a 1 lux. El filtre groc pot ser més indicat si l'objectiu final és reduir l'emissió en els blaus de les pantalles.

5.3. Blue Light Eyecare

L'aplicació següent és *Blue Light Eyecare*, és una *app* molt semblant al *Filtro luz azul*, ja que també disposa de diversos filtres de color. Com s'ha comprovat abans, el filtre gris realment no serveix per atenuar el blau sinó que afecta a tot el visible, però aquesta raó no es tornarà a fer. El filtre que analitzarem serà el de color groc que es mostra a la **figura 5.10**.

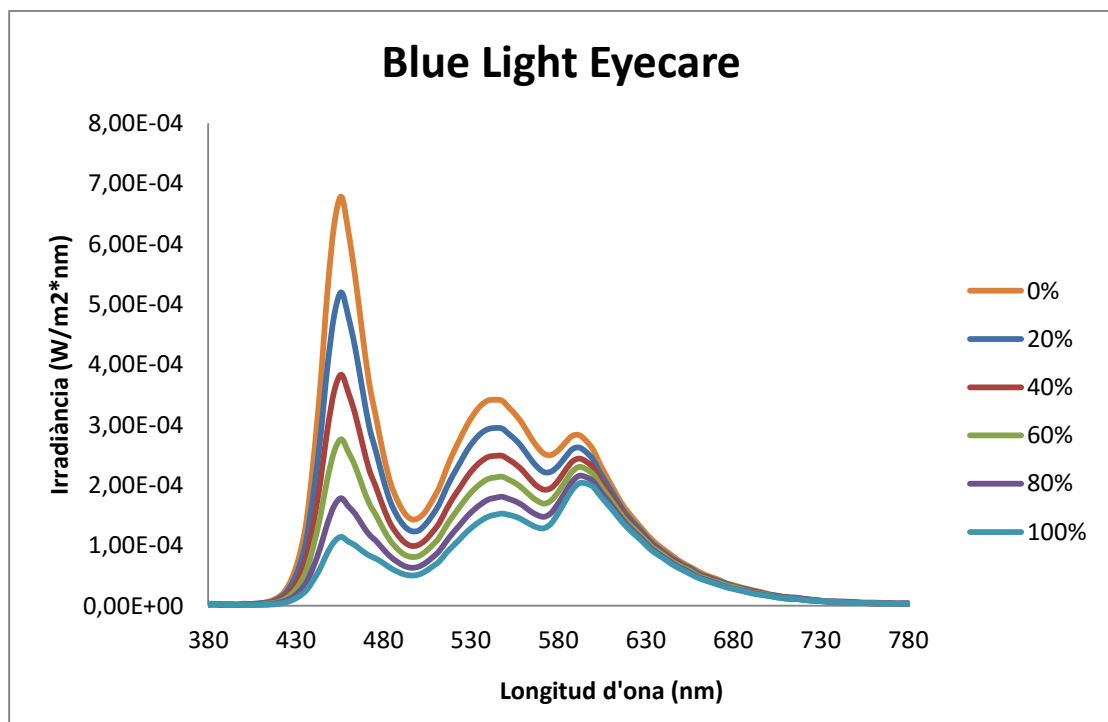


Figura 5.10. Corba d'irradiància en el visible de la *app Blue Light Eyecare* en funció de diferents percentatges d'atenuació del filtre groc aplicat.

En la **figura 5.10**, es mostren sis corbes d'irradiància, com la del 0% equivalent a no tenir cap filtre i la de 100% amb al màxim d'atenuació de filtre aplicat (que tot i el seu nom, no significa

que hi hagi una atenuació total de l'emissió de la pantalla). El pic més alt que trobem, com era d'esperar, és a la franja del blau, concretament a 456nm, excepte al filtre de 80% i 100% que el seu pic es troba a 592nm (taronja – vermell). Aquest filtre també afecta a la franja del verd, és a dir, com més gran sigui l'atenuació del filtre aplicat menys irradiància hi ha en els verds. En el cas dels vermells, la seva atenuació no és gaire remarcable, encara que si que disminueix una mica.

El percentatge real d'atenuació dels blaus de l'aplicació és del 23% amb el filtre del 20%, 44% amb el de 40%, 60% amb el filtre de 60% (en aquest cas si que coincideix), 74% amb el filtre de 80% i 83% amb el filtre de 100%.

Com la franja dels vermells no disminueix molt, l'aplicació fa que els colors de la pantalla a mesura que anem augmentant el filtre es moguin fins a una gama més càlida com es mostra a la **figura 5.11**.

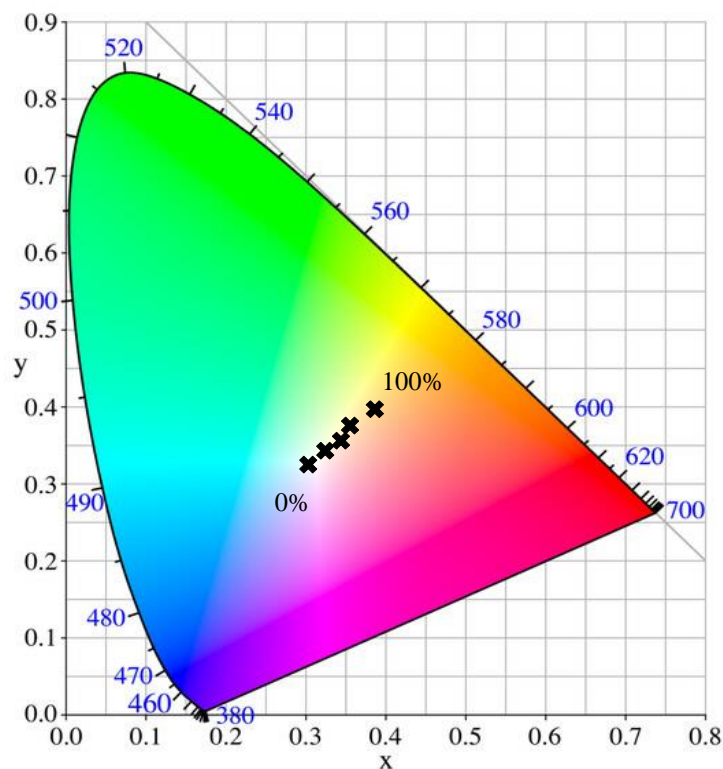


Figura 5.11. Coordenades cromàtiques a l'espai CIELAB 1931 de *Blue Light Eyecare*.

A la **figura 5.11.** es mostren les coordenades cromàtiques a la que es troba la pantalla. S'observa com hi ha una relació bastant lineal entre els punts, el que provoca que la pantalla tingui colors més càlids a mesura que s'augmenta el percentatge d'atenuació del filtre.

En la **figura 5.12.** podem veure la resposta dels fotoreceptors a l'emissió de llum de la pantalla amb diferents percentatges d'atenuació dels filtres.

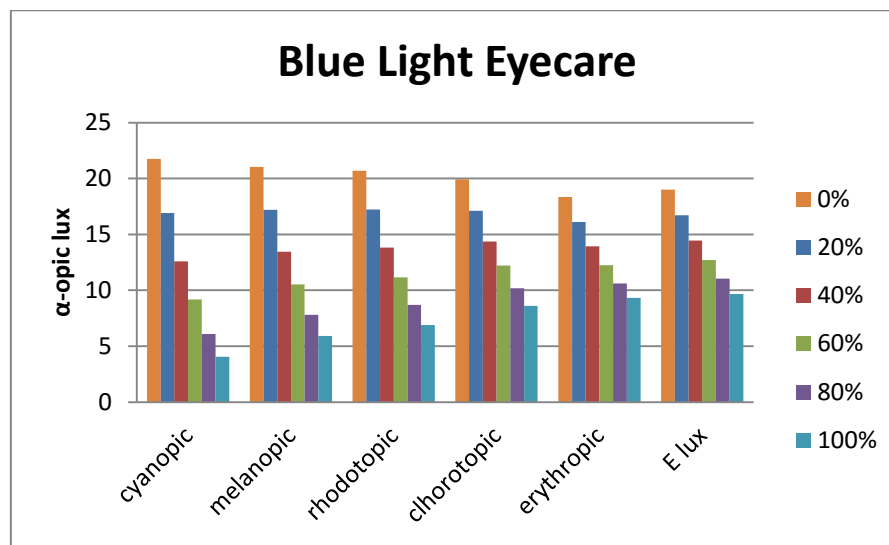


Figura 5.12. Reacció dels fotoreceptors a la llum emesa per la pantalla en l'app *Blue Light Eyecare*.

De nou, només en el cas de la pantalla sense filtre (0% d'atenuació del filtre) els Mel-lux estan per sobre del llindar marcat prèviament (20 Mel-lux). Però a l'hora d'aplicar un filtre el valor es redueix per sota dels 20 Mel-lux, i la reducció és més gran, quan més gran és el percentatge d'atenuació del filtre. L'energia total emesa pel dispositiu sense cap filtre és de 19 lux i amb el màxim percentatge de filtre aplicat l'energia es redueix a 9 lux.

5.4. Comparació d'aplicacions Android

Si comparem les tres aplicacions analitzades per la tauleta gràfica, es pot observar com totes redueixen la llum blava en més o menys grau. L'aplicació *Twilight* és la que menys redueix aquesta longitud d'ona, perquè tot i modificar la Tc del filtre aplicat, s'arriba a un percentatge màxim d'atenuació de la llum blava entorn del 50%. Les altres aplicacions, *Filtro de luz azul* i *Blue light eyecare*, ambdues amb un filtre groc (no considerem el *Filtro luz azul* de color gris), permeten reduir la llum blava en un percentatge més gran a mesura que augmentem el grau d'atenuació del filtre aplicat. Si ens fixem en la variació del color que es percep a la tauleta,

veiem que *Twilight* és l'app que menys altera la percepció del color, mentre que el *Blue Light Eyecare* és la que més afecta al color.

5.5. Night Shift

A continuació es donen els resultats obtinguts per la configuració de pantalla del sistema operatiu IOS en un Iphone 5s.

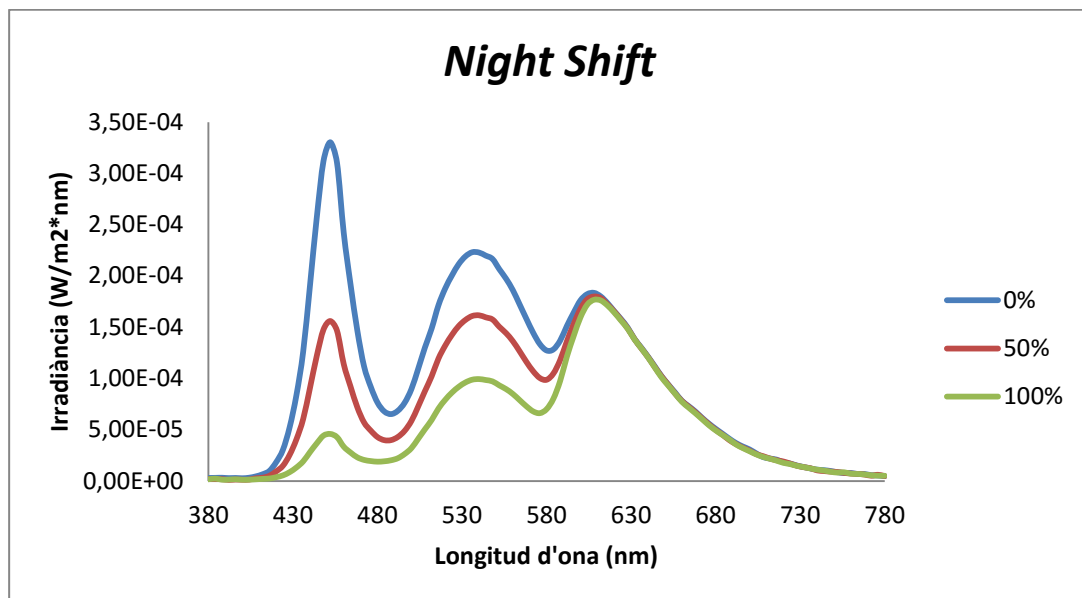


Figura 5.13. Corba d'irradiància en el visible de la configuració de pantalla *Night Shift* en funció de percentatge d'atenuació del filtre aplicat.

La **figura 5.13.** ens mostra la irradiància espectral mesurada amb Iphone 5s. Primerament, observem que els valors d'irradiància mesurats amb aquest dispositiu, són clarament inferiors als mesurats amb la tauleta, ja que la pantalla d'un smartphone és més petita que la de la tauleta. Això fa que, en general, a la mateixa distància de mesura, arribi menys irradiància al espectoradiòmetre.

A la **figura 5.13.** es poden observar tres pics molt marcats, un a 452nm (franja dels blaus), un altre a 540nm (franja dels verds) i l'últim a 608nm (franja dels taronges – vermells). Sense cap filtre aplicat (percentatge del 0%), el pic màxim d'emissió es troba als blaus, en canvi amb el 50% i 100% de filtre el màxim està als vermells. La reducció del color blau en aquest cas és del 52% quan el filtre està al 50% i del 86% quan el filtre està al màxim. Els vermells en canvi, romanen pràcticament inalterats. En el centre de l'espectre visible, en la regió dels verds, la

reducció també és notable segons el filtre aplicat, però en menys percentatge que en el cas dels blaus.

El més interessant d'aquest gràfic, a part de la forta atenuació de la llum blava, és que la franja dels vermells queda inalterada, com a conseqüència d'això, la gama de colors de la pantalla quedarà molt afectada cap uns colors més càlids com mostra la **figura 5.14**.

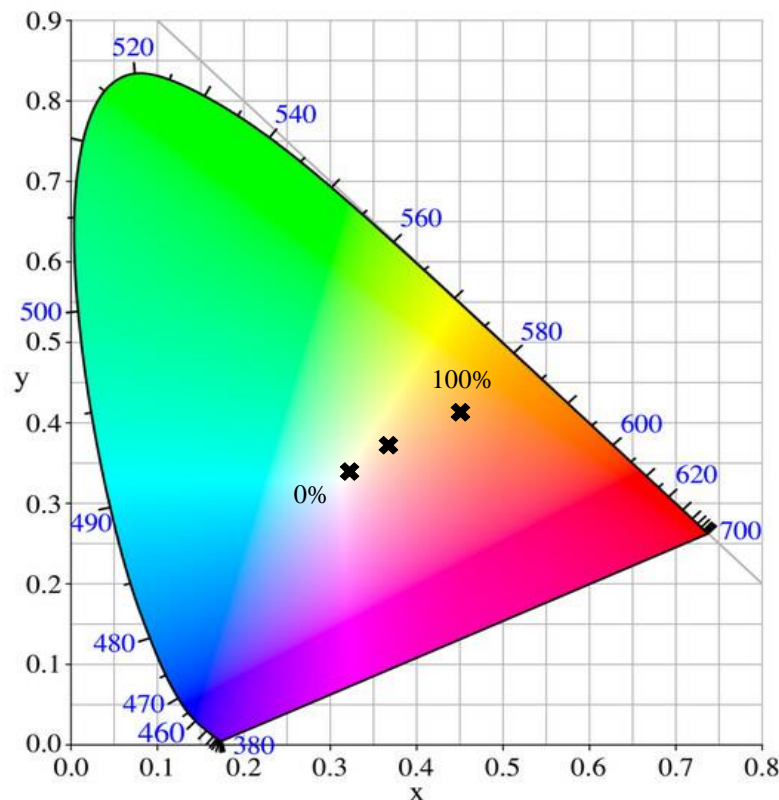


Figura 5.14. Coordenades cromàtiques a l'espai CIELAB 1931 de *Night Shift*.

A la **figura 5.14**, es mostra la gran variació de temperatura de color que aquest filtre produeix. El punt del 0% de filtre es troba sobre la coordenada cromàtica del blanc i el punt del 100% es troba a la franja del vermells, però molt separat de la resta.

La **figura 5.15** mostra la resposta dels fotoreceptors per aquest dispositiu. En la darrera columna de la gràfica veiem que l'intensitat màxima emesa per la pantalla és de 13 lux, en canvi amb el filtre del 100% és de 7 lux.

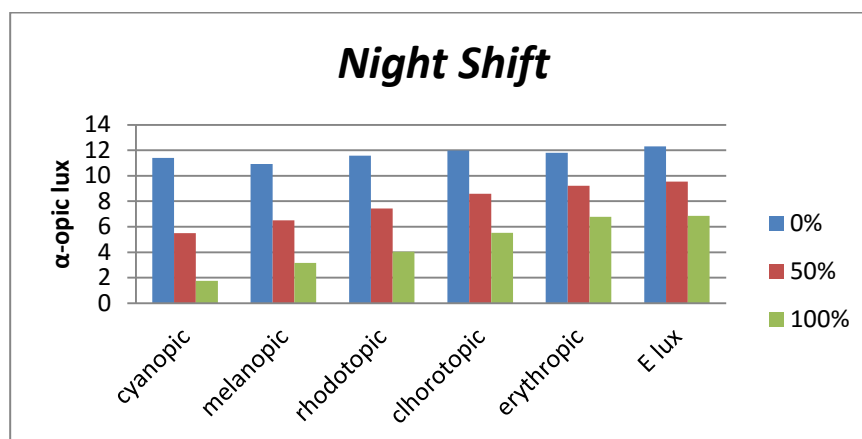


Figura 5.15. Reacció dels fotoreceptors a la llum emesa per la pantalla en l'app *Night Shift*.

Com s'observa en la **figura 5.15** la columna del *melanopic* no està per sobre dels 20 Mel-lux, ja que la pantalla analitzada és molt petita (92 x 53 mm) i la seva màxima energia emesa és de 13 lux. Tot i que l'aplicació del filtre redueix els lux melanòpics, podem dir que en cap cas, mirant la pantalla d'aquest mòbil a 40cm de distància estariem per sobre del llindar dels 20 Mel-lux.

5.6. *f.lux*

A continuació s'analitza l'emissió de la pantalla d'un ordinador portàtil Asus, i es mostren els resultats de la aplicació *f.lux* per Windows.

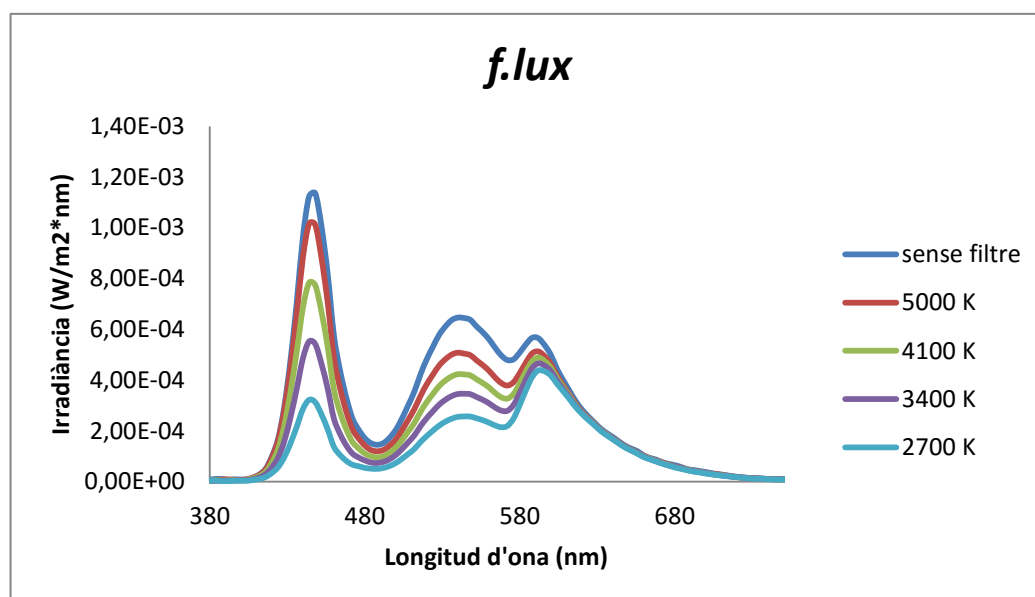


Figura 5.16. Corba d'irradiància en el visible de l'app *f.lux* en funció de la Tc del filtre aplicat.

L'aplicació f.lux permet modificar la Tc del filtre aplicat. La **figura 5.16.** mostra la irradiància de la pantalla de l'ordinador a la zona del visible (corba blava, sense filtre). Es pot observar com la irradiància d'aquest espectre és la més alta de tots els resultats presentats fins ara, això és així perquè correspon a la pantalla més gran (portàtil davant de tauleta o mòbil).

El pic de màxima irradiància es troba en la regió dels blaus entre les longituds d'ona 444nm i 448nm, excepte en la corba de 2700K on el màxim està a 592nm (colors taronja – vermells). L'atenuació en el pic blau és del 9,5% amb el filtre de 5000K, de 30% amb el de 4100K, de 51% amb el de 3400K i de 71% amb el de 2700K.

En aquesta aplicació, la franja dels vermells no queda gaire alterada, en canvi la regió dels verds es redueix considerablement, però en menys proporció que els blaus. Això fa que el color de la pantalla quedi alterar a una gama més vermella com s'observa a la **figura 5.17.**

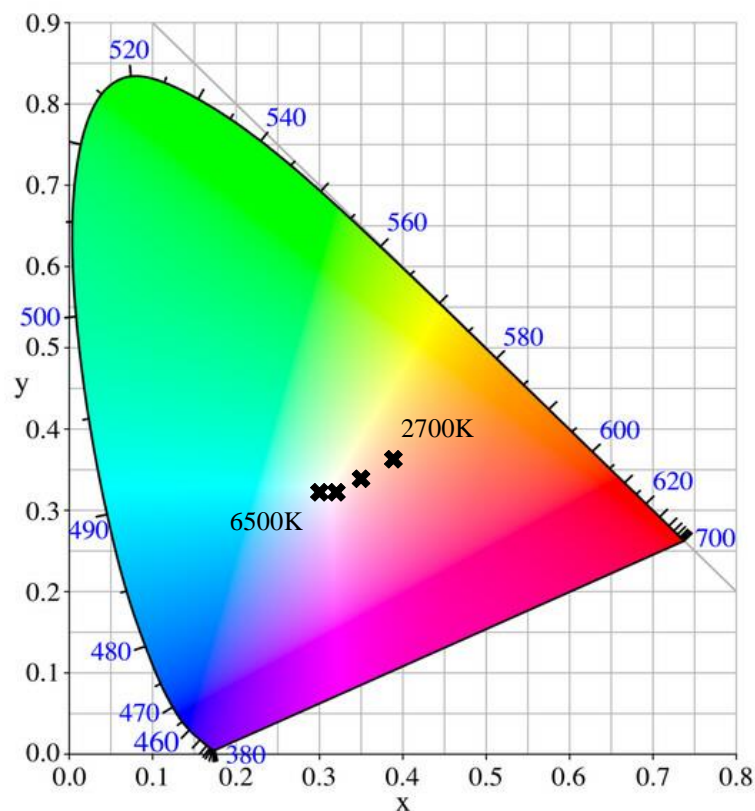


Figura 5.18. Coordenades cromàtiques a l'espai CIELAB 1931 del f.lux.

Es pot veure en la **figura 5.18** com hi ha una progressió gradual cap a colors més càlids, quan considerem filtres amb Tc més baixes. Aquest fet, fa que la percepció del blanc que es mostra a la pantalla sigui molt més vermellós.

La pantalla que s'ha analitzat per aquesta *app* és la més gran amb unes dimensions de 340 x 195 mm, això fa que la il·luminació que arriba a la còrnia emesa per la pantalla sigui la més gran de les mesures fins el moment (**figura 5.19**).

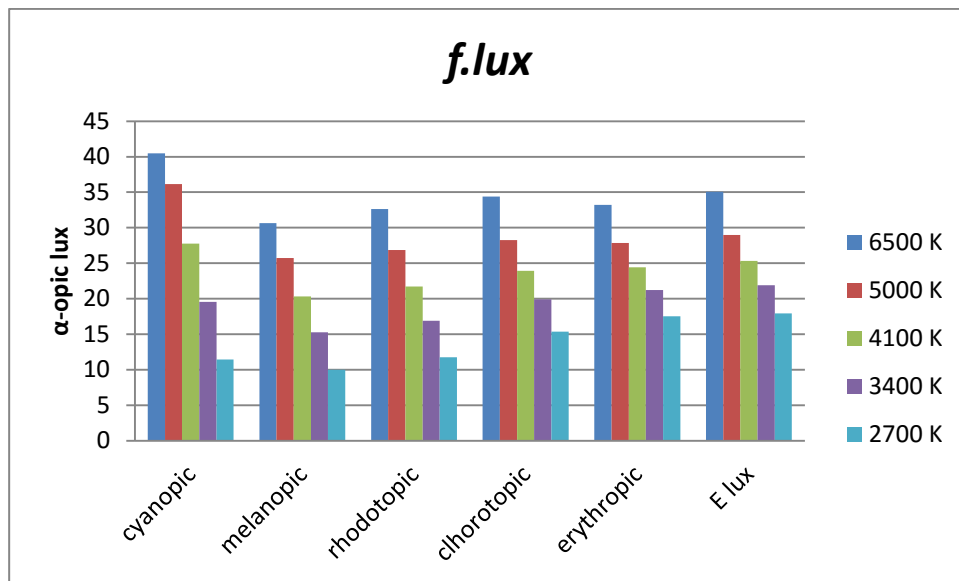


Figura 5.19. Resposta dels fotoreceptors a la llum emesa per la pantalla en l'*app f.lux* amb diferents Tc del filtre aplicat

A la **figura 5.19** podem observar com l'emissió de la pantalla del portàtil sense filtre aplicat arriba als 35 lux, que correspon als valors més alts de tots els dispositius analitzats. La il·luminació de la pantalla amb l' *f.lux* activat i Tc=6500K (equivalent a no posar l'*app*) és de 35 lux i amb la Tc més baixa del filtre de 2700K és de 19 lux. Si ens fixem en la columna de melanopic-lux hi han tres valors de temperatura de color que es troben per sobre dels 20 Mel-lux. Aquests valors són els de 6500K (equivalent a la pantalla sense filtre), 5000 K i 4100 K, coincidint aquest últim amb el llindar. Per tant, si ens exposem a la llum del ordinador durant una hora a la nit sense cap filtre aplicat, s'inhibirà un percentatge molt superior al 6% de la producció de melatonina. En cas d'activa l'aplicació caldrà recórrer a Tc=3400K o inferiors, per trobar-nos per sota del llindar dels 20 Mel-lux.

5.7. Làmines d'absorció selectiva *Reticare*

Les làmines *Reticare* disponibles tenien unes dimensions inferiors a la pantalla de l'ordinador, per la qual cosa, es va procedir a tapar part de la superfície de la pantalla tal com s'ha indicat a l'apartat de metodologia. Es va comprovar que l'emissió de la pantalla, amb tota la seva àrea, o tapant una determinada regió, només es veia modificada per l'energia total mesurada, però en cap cas modificava la informació espectral, com era de preveure. Amb la pantalla gran sencera i sense cap filtre aplicat l'espectroradiòmetre mesurava 35 lux i amb la retallada arribaven 19 lux.

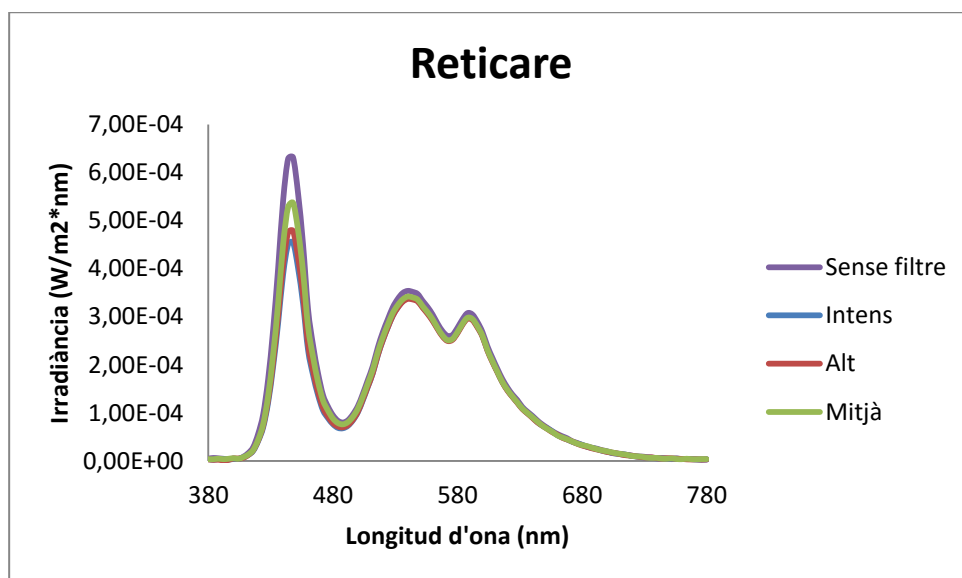


Figura 5.20. Corba d'irradiància en el visible de les làmines absorbents *Reticare* amb diferents nivells d'absorció.

En la **figura 5.20.** es mostren les corbes d'irradiància espectral pels diferents nivells d'absorció de les làmines *Reticare* (intens, alt i mitjà). En tots els casos, s'observa un pic de màxima emissió a 448nm (franja dels blaus) i dos pics relatius a 540nm (verds) i 588nm (taronges – vermells). L'efecte que produeixen les làmines *Reticare* és la d'atenuar principalment els blaus. El filtre que més atenua els blaus és l'intens amb un 28%, el segueix l'alt amb un 24% i l'últim és el mitjà amb un 15% d'atenuació. Cal dir que en el mercat existeix un quart nivell d'atenuació, el baix, però que no el teníem disponible per fer les mesures.

Aquest tipus de filtre hardware només afecta a la franja dels blaus, ja que la resta de colors queda gairebé inalterada. A la **figura 5.21** es mostren les coordenades cromàtiques CIELAB quan es percep una pantalla blanca a la pantalla a través d'aquestes làmines *Reticare*.

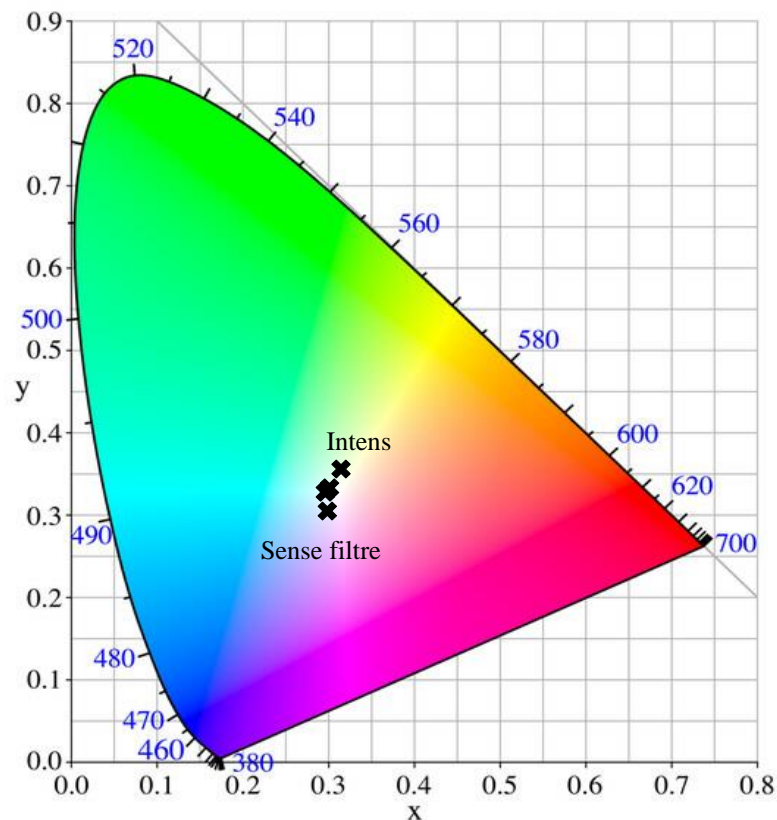


Figura 5.21. Coordenades cromàtiques a l'espai CIELAB 1931 de les làmines absorbent *Reticare*.

Com es mostra a la **figura 5.21** les coordenades cromàtiques no queden gaire afectades, mantenint-se prou properes a la zona del blanc de referència, i veient en tot cas una tendència cap a colors més càlids per la làmina d'atenuació intensa. Aquest comportament concorda amb el fet, que l'alteració de l'emissió de la pantalla per part d'aquestes làmines és molt poc acusada. Una nova evidència d'aquest fet es veu a la **figura 5.22** si observem els lux totals emesos per la pantalla. Quan aquesta no incorpora cap filtre, la il·luminació és d'uns 19 lux, mentre que amb qualsevol de les tres làmines analitzades, el valor es manté en uns 18 lux.

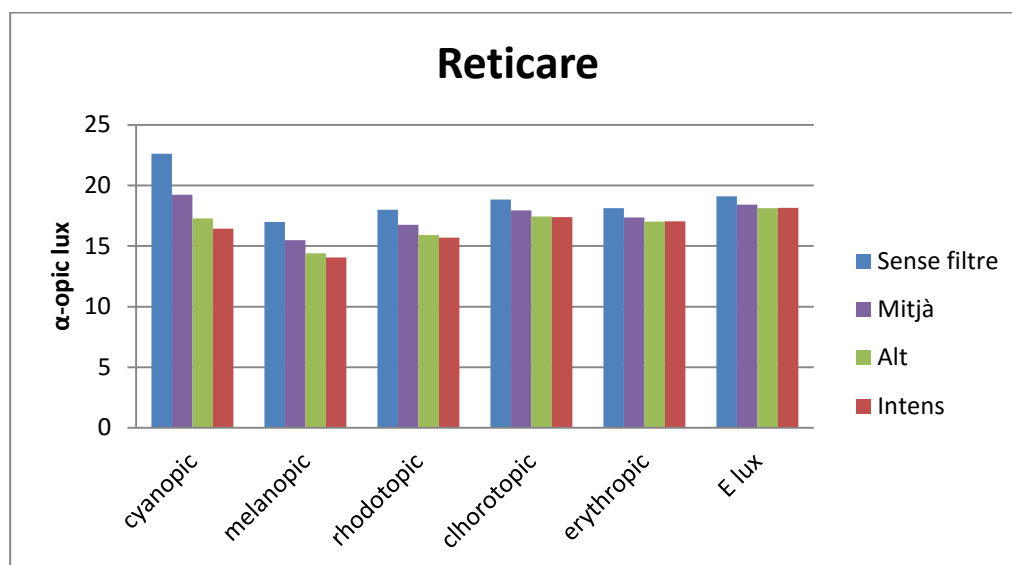


Figura 5.22. Resposta dels fotoreceptors a la llum emesa per la pantalla amb incorporació de les làmines *Reticare* amb diferent grau d'atenuació de la llum blava.

A la **figura 5.22** es mostra la resposta dels fotoreceptors a la llum emesa per la pantalla quan incorporem les làmines *Reticare* amb diferent grau d'atenuació de la llum blava. En qualsevol dels fotoreceptors, veiem que la variació és molt petita com correspon a les petites modificacions introduïdes pels filtres. Si observem la columna de melanopic-lux, la resposta no supera mai el llindar establert de 20 Mel-lux en les condicions de mesura, per tant la inhibició de producció de melatonina estarà per sota de 6%.

5.8. Lents oftàlmiques

Finalment, s'han estudiat els filtres blaus incorporats en lents oftàlmiques. Com en les làmines absorbents les proves s'han fet sobre la pantalla modificada, mantenint la mateixa àrea que en l'apartat anterior per poder facilitar la comparació de resultats. En aquest cas s'ha pres com a referència la mesura d'irradiància espectral d'una lent neutra amb amb potència zero i només un tractament antireflexant normal. D'aquesta manera, les lents amb filtres que es compararan també tindran potència zero, tractament antireflexant, i adicionalment el filtre blau, i es podrà tenir en compte la reflectància en incidència normal que tenen les lents, o possibles efectes de la seva curvatura.

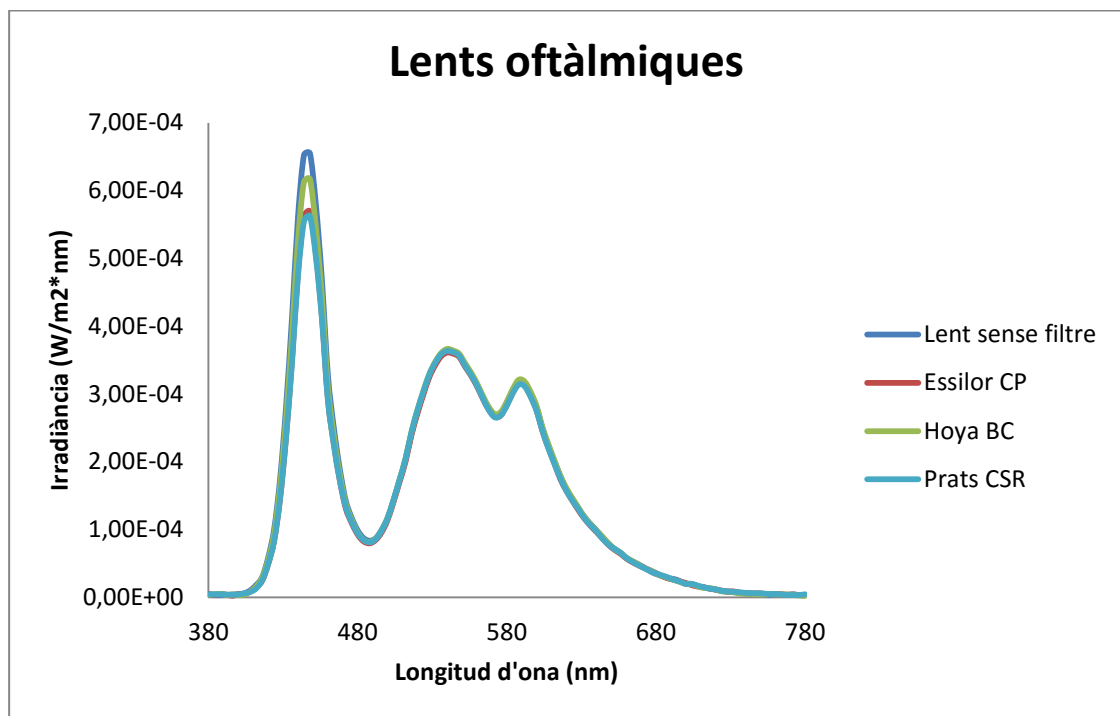


Figura 5.23. Corba d'irradiància en el visible de diferents lents oftàlmiques amb filtre blau.

En la **figura 5.23.** s'observen els espectre mesurats per a diferents lents de diverses cases comercials. Com a la resta de gràfiques d'irradiància existeixen tres pics propis de l'emissió de la pantalla del portàtil retro-il·luminada amb LEDs: un a 448nm (pic màxim), altre a 540nm i l'últim a 580nm. Es pot veure com, per l'efecte del filtre blau, només varia el pic d'emissió en la franja dels blaus i la resta de longituds d'ona es mantenen pràcticament igual. La lent que més redueix el pic blau és la CSR de Prats amb un 14%, seguit pel Crizal Prevencia d'Essilor amb un 13% i com a lent que menys atenua la radiació blava trobem la d'Hoya amb el filtre Blue Control que redueix un 7%.

En la **figura 5.24.** podem veure el canvi en les coordenades cromàtiques que provoquen aquestes lents sobre una imatge blanca mostrada sobre la pantalla. S'observen com els punts corresponents a les coordenades xy estan molt junts, ja que aquest filtres redueixen molt poc l'emissió blava de la pantalla, i com a conseqüència no hi ha gaire alteració de color.

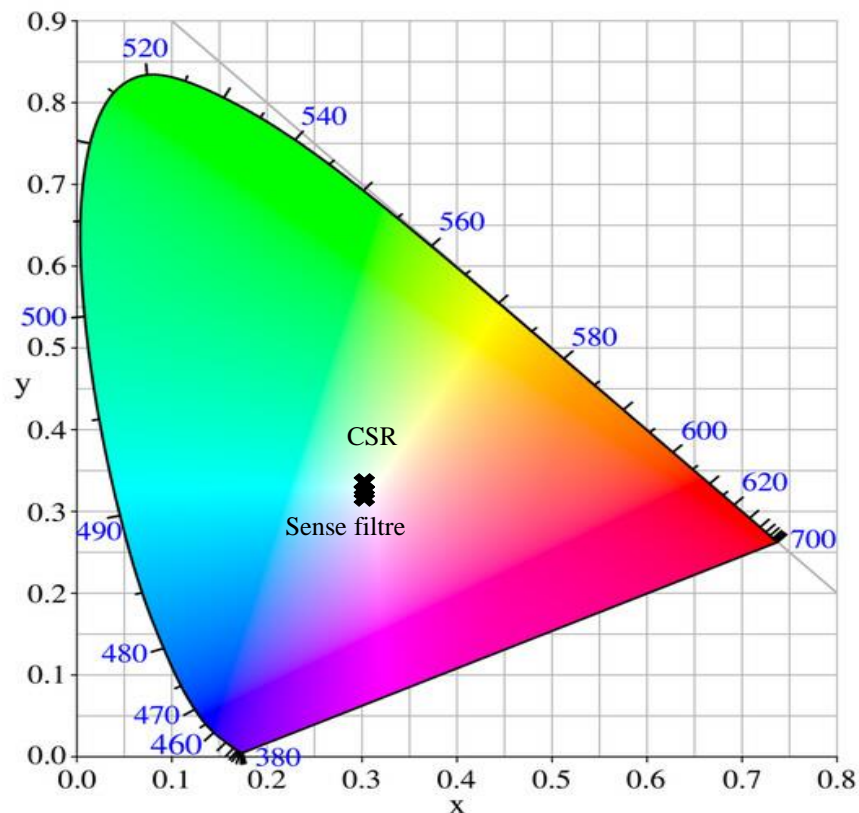


Figura 5.24. Coordenades cromàtiques a l'espai CIELAB 1931 de les lents oftàlmiques.

Si comparem la resposta dels fotoreceptors (**figura 5.25**) a la llum transmesa a través de les lents, es pot veure com totes les respostes estan molt igualades amb els diferents filtres analitzats i també amb la lent que no disposa de filtre blau. En tot cas, les mesures de melanopic-lux sempre estan per sota dels 20 Mel-lux.

De les mesures obtingudes dels filtres blaus en lents oftàlmiques veiem que no modifiquen massa la llum emesa per la pantalla, ni tant sols en el rang dels blaus. Hem de suposar que aquest fet està molt lligat amb que els usuaris prefereixen vidres totalment transparents en ulleres, i per tant, si el filtratge fos més gran, els vidres prendrien una coloració més important.

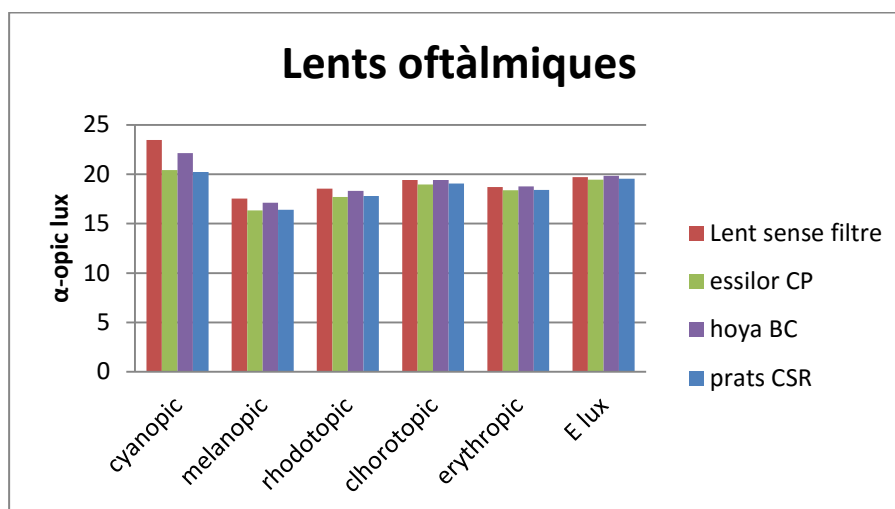


Figura 5.25. Resposta dels fotoreceptors a la llum emesa per la pantalla utilitzant diferents lents oftàlmiques amb filtre blau.

5.9. Imatges

Amb tots els resultats mostrats, s'ha partit sempre de la visualització d'una imatge uniforme blanca a la pantalla, que a la vegada té la seva màxima il·luminació possible. Això s'ha fet així per tal de poder tenir les mesures d'irradiància espectral i calcular la resposta dels fotoreceptors en les condicions més desfavorables possibles, és a dir amb la recepció de la màxima radiació per part del sistema visual. Davant d'aquest fet, volem analitzar també si les imatges que ens podem mirar habitualment a les pantalles dels diferents dispositius, emeten espectres molt o poc diferents al mesurat amb la pantalla en blanc. Per això, a continuació, a la **figura 5.26** es mostraran les corbes d'irradiància espectral de dues imatges mostrades tant en color i com en blanc i negre, que es van visualitzar en el portàtil Asus F555L.

S'ha escollit una imatge d'una botiga, molt acolorida, perquè té elements amb colors molt variats a l'espectre visible, i una segona imatge d'un port, on el color predominant és clarament el blau.



Figura 5.26. Imatges en color analitzades. Aquestes mateixes imatges s'han visualitzat també en blanc i negre.

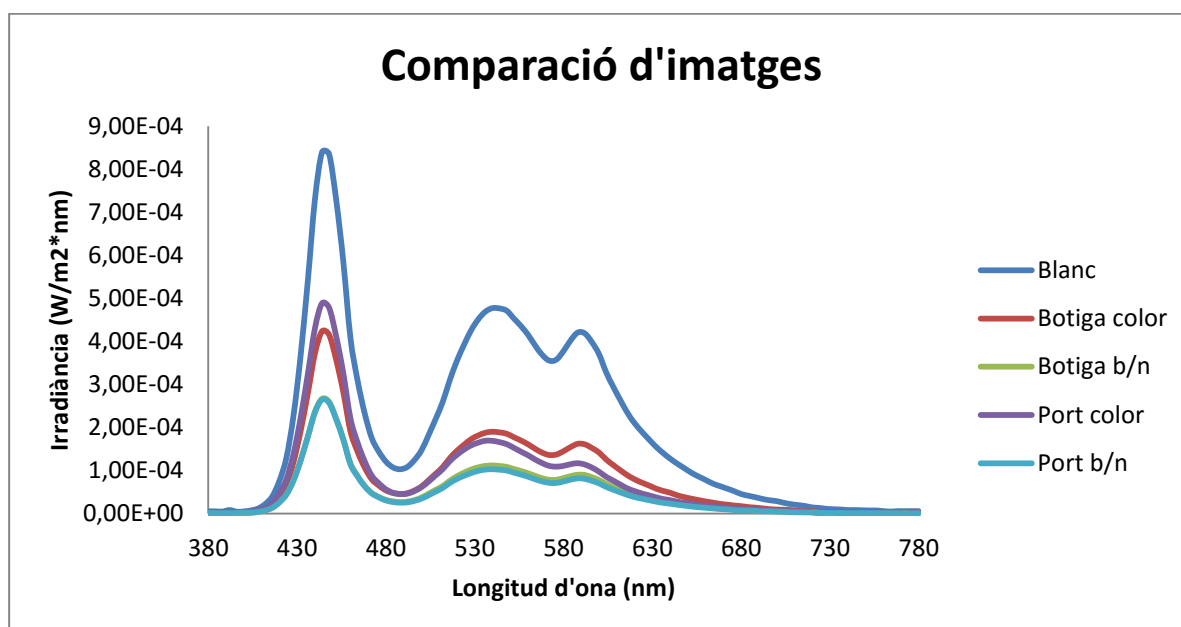


Figura 5.27. Corba d'irradiància espectral en el visible de fotografies reals.

En la **figura 5.27.** es mostra la corba d'irradiància d'una imatge uniforme blanca per tal de comparar els resultats de les fotografies. Conjuntament, es mostren les corbes obtingudes per les fotografies en color mostrades en la **figura 5.26**, i les mateixes fotografies quan són mostrades en nivells de gris (blanc i negre). En els gràfics d'irradiància espectral es reconeix el perfil característic del sistema d'il·luminació amb LEDs RGB, si bé, els valors d'irradiància varien en funció de la longitud d'ona segons els colors presents a les fotografies. Per exemple, es pot observar com el pic màxim es troba sempre a la franja dels blaus (444nm),

més remarcable en les fotografies de color que en les blanc i negre, i sobretot més predominant en la fotografia del port, on el color blau és més present.

Es pot veure com en una imatge blanca la irradiància del color blau emesa per la pantalla, és molt més alta que en una fotografia en color, i encara més en una en blanc i negre. Les dues fotografies en nivells de grisos mostrades, mostren un espectre molt semblant. En qualsevol cas, constatem que al visualitzar imatges reals en un dispositiu electrònic, estarem en general, per sota dels nivells de radiació màxims que pot donar una pantalla digital.

Si comparem la resposta dels fotoreceptors (**figura 5.28**), s'observa com només la imatge uniforme blanca, en la columna de melanopic lux, es troba per sobre dels 20 Mel-lux i les fotografies reals, siguin en color o en nivells de gris, es troben molt per sota. Amb les imatges escollides per fer aquest test, la il·luminació de la pantalla quan es mostra una imatge en color decau per sota del 50% en comparació a la referència d'un blanc uniforme, i al voltant d'un 80% si la fotografia es mostra en nivells de gris.

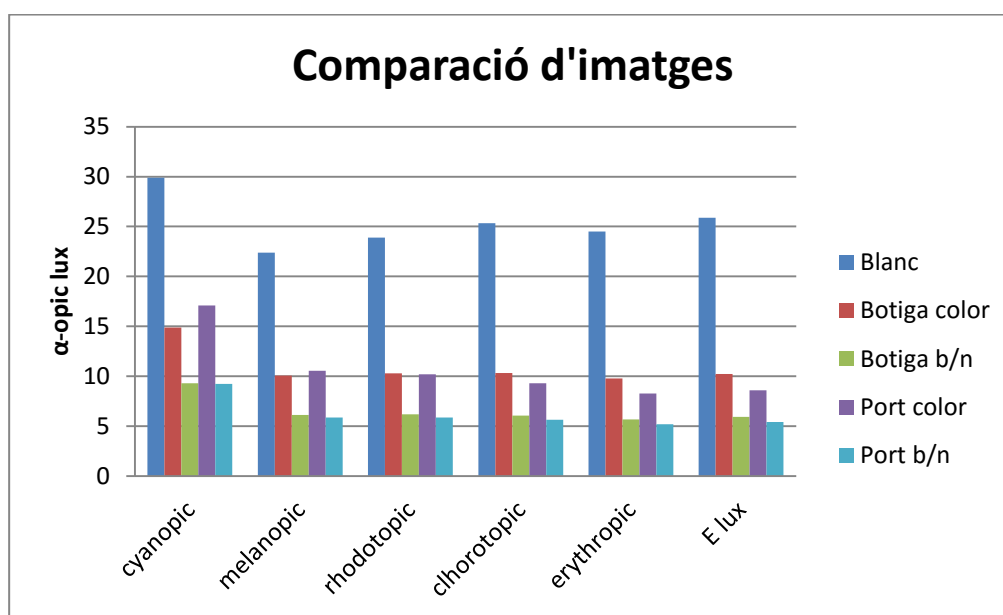


Figura 5.28. Resposta dels fotoreceptors a la llum emesa per la pantalla quan es mostren diferents fotografies en color i en blanc i negre.

5.10. Discussió dels resultats obtinguts

La comparació de tots els resultats analitzats, ha de tenir en compte en primer lloc que s'ha fet amb dispositius electrònics diferents amb mides de pantalles diverses. En tots els casos,

s'han obtingut els resultats mesurant la irradiància espectral a la mateixa distància d'observació, 40 cm. Aquesta distància pot ser una bona distància en el cas del portàtil i de la tauleta, si bé en el cas del mòbil, és habitual visualitzar-lo des d'una distància més curta. Hem preferit però, mantenir la mateixa distància per facilitar la comparació dels resultats.

Tal com correspon a la mida de les pantalles utilitzades, el portàtil dóna una il·luminació més elevada que la tauleta gràfica, i aquesta, més gran que el mòbil. Les aplicacions disponibles estudiades, són diferents en funció dels dispositius. Algunes permeten seleccionar el filtre aplicat varien la temperatura de color. Amb T_c més baixes, s'apliquen tonalitats més càlides amb menys emissió de blaus. Altres aplicacions, varien el percentatge d'atenuació del filtre aplicat. El valor del percentatge és indicatiu del grau d'atenuació de la component blava d'emissió de la pantalla, si bé el seu valor numèric s'ha de prendre de forma orientativa.

Si comparem totes les *apps* es pot veure com la que més redueix la llum blava és el *Filtro luz azul* (88%) amb el filtre de color groc, però com a conseqüència també redueix molt la zona dels verds i dels vermells. La segona aplicació que redueix més el blau és el *Night Shift* (86%) del sistema operatiu IOS. Aquesta aplicació afecta molt a la franja blava i a la dels verds, però els vermells els manté, provocant així una variació del color més gran cap a una gamma més càlida. Excepte el filtre *Twilight*, totes les aplicacions estan entre el 71% (*f.lux*) i 88% (*Filtro luz azul*) de reducció del color blau. L'aplicació *Twilight* permet un màxim d'atenuació entorn del 50%, tot i que s'escollin T_c molt baixes.

Finalment, s'ha comparat el funcionament dels filtres per software, amb els filtres hardware comercials. En concret, s'han avaluat les làmines *Reticare* d'absorbància selectiva i els filtres blaus incorporats en algunes lents oftàlmiques. En general, podem dir que els filtres hardware redueixen menys la component blava de l'emissió de les pantalles que les *apps* analitzades. Les aplicacions per software tenen l'avantatge de poder actualitzar i modificar el filtre en qualsevol moment, des de la mateixa aplicació. A més totes les aplicacions estudiades estan accessibles a la xarxa de manera gratuïta. En canvi, els filtres hardware s'han d'adquirir en comerços i un cop escollits no permeten modificacions. Els fabricants, sobretot de filtres per lents oftàlmiques, intenten reduir la longitud d'ona blava sense alterar de manera apreciable el color, per tal de tenir una major acceptació per part dels usuaris.

6. Conclusions i treballs futurs

A partir de l'estudi realitzat es poden extreure les conclusions següents:

- Les pantalles retro-il·luminades utilitzades en les proves de laboratori, totes elles amb tecnologia LED RGB, presenten un pic d'emissió màxim en la franja dels blaus, entre els 444nm i 456nm. Aquest pic en el blau és entre un 30 i un 50% més alt que la resta de l'espectre d'emissió en funció del dispositiu.
- Per a una mateixa distància d'observació, la irràndia mesurada i la il·luminació calculada que rebria la còrnia, són directament proporcionals a les dimensions de la pantalla utilitzada. En el cas del portàtil *Asus* model *F555L*, amb una pantalla de 340 x 195 mm, la il·luminació màxima obtinguda era de 36 lux, la més alta, en la tauleta gràfica amb una pantalla de 151 x 95 mm era de 19 lux, i en el mòbil *Iphone 5s* amb una pantalla de 92 x 53 mm, era la més baixa de 13 lux.
- En el mercat informàtic existeixen diversos tipus de filtre de llum blava que es poden instal·lar en dispositius electrònics. En el cas de les taules gràfiques amb el sistema operatiu *Android* hi ha més varietat que en la resta. En el nostre cas ens hem centrat en 3 aplicacions diferents: *Twilight*, *Filtro de luz azul*, i *Blue light eyecare*. Com a dispositiu *smartphone* s'ha analitzat un mòbil amb sistema *IOS*, el qual disposava de l'app *Night Shift*. Per ordinador, l'aplicació més coneguda, i que permet la seva instal·lació tant en el sistema operatiu *Windows* com *IOS*, és *l'f.lux*. És molt probable però que apareguin noves aplicacions que permetin controlar l'emissió de les pantalles i en concret reduir la component blava més perjudicial.
- Les aplicacions depenen del dispositiu electrònic en el que s'instal·lin. En general, els paràmetres de control són, o bé la temperatura de color del filtre que es vol aplicar, variant entre tonalitats més fredes o més càlides, o bé el percentatge d'atenuació del filtre. Per cada dispositiu i software s'ha determinat el valor dels paràmetres de control que equival a no aplicar cap filtratge, així com el valor màxim d'atenuació de l'emissió.
- De les apps d'*Android*, amb el màxim filtratge activat, la que més redueix el blau és el *Filtro luz azul* amb un 88% i la que menys el *Twilight* amb un 50%. Si comparem totes les aplicacions analitzades, el *Filtro luz azul* és la que més atenua els blaus, seguida molt de prop pel *Night Shift* amb un 86% i pel *Blue Light Eyecare* amb un 83%. *L'f.lux* és el quart amb un 71% i l'últim el *Twilight* (50%).
- S'ha comprovat com en imatges reals o fotografies observades a la pantalla, l'espectre d'emissió de la pantalla és en general més baix per totes les longituds d'ona en

comparació amb una imatge uniforme en blanc. En particular, el pic d'emissió en la regió dels blaus també es veu reduït quan es visualitza una fotografia en comparació amb un fons blanc. En el cas de comparar dues imatges, una en color i l'altre en blanc i negre, l'espectre d'emissió de la imatge en color és més gran que la que es troba en nivells de gris.

- Amb els resultats obtinguts d'anàlisi de totes les aplicacions i dispositius, podem afirmar que com més es redueix la franja dels blaus (més percentatge d'atenuació del filtre aplicat), i més es modifiquin els valors relatius d'emissió en tot l'espectre visible, més modificació de les components cromàtiques xy CIELAB 1931, tindrà la imatge blanca visualitzada, provocant una variació del color cap a tonalitats més càlides (groguenques o vermelloses).
- En el cas dels filtres externs que es venen en el mercat com les làmines absorbents *Reticare* o els filtres blaus en lents oftàlmiques, el grau de filtratge de llum blava és molt menor que en les *apps* que hi ha pels diferents sistemes operatius. Segons les mesures realitzades, la làmina *Reticare* amb el filtre intens és la que proporciona una atenuació més gran amb un 28% i la lent *CSR* amb un 14%. Les altres mostres analitzades presenten atenuacions molt menors. Aquesta reducció menor de la llum blava es pot deure al fet de que les cases comercials volen preservar al màxim la percepció del color a través de les làmines i les lents oftàlmiques i això impedeix assolir nivells d'atenuació més alts. Per altra banda, la versatilitat que presenten les aplicacions per software, és un gran avantatge d'aquestes eines davant la rigidesa dels filtres per hardware.

Si bé el treball s'ha realitzat amb uns dispositius electrònics concrets i s'han estudiat un nombre limitat d'*apps* i paràmetres de control, creiem que els resultats obtinguts en aquest treball, mostren de forma adequada l'emissió de les pantalles retro-il·luminades per LEDs i el funcionament dels filtres blaus per software. El fet que les aplicacions depenen del dispositiu en què s'instal·len dificulta una mica la seva comparació, ja que els paràmetres de control no són els mateixos en tots els casos.

Una anàlisi més exhaustiva hauria de comparar imatges mostrades en diferents ordinadors, ja que no tots tenen la mateixa emissió o mida, com també en diferents tauletes o mòbils. Caldria també afinar en la distància de treball a la que se situen els usuaris, si bé aquest paràmetre depèn de la tasca que es realitza, segons requereixi més concentració o menys. Tot plegat, podria donar un coneixement més ampli de com afecta l'emissió de les pantalles en el sistema visual i en els ritmes circadians.

7. Bibliografia

Figures

Figura 2.1. Espectre electromagnètic complet. En línia a l'abril de 2016. Disponible a: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/73/Espectre_electromagn%C3%A8tic_CO_MPLET_en_catal%C3%A0.png

Figura 2.3.a. Díode de LED blanc. En línia a l'abril de 2016. Disponible a: <http://www.electronicaembajadores.com/Subfamilias/Productos/-1/SMDL/diodos-y-displays-leds>

Figura 2.3.b. Composició d'una xarxa de díodes LED. Disponible a: Assignatura Ergonomia de la visió. Tema 7: Fonts de llum . Grau d'òptica i optometria de la UPC (Catalunya) 2015.

Figura 2.4. La triada vermell - verd - blau, coneguda també com RGB (Red, Green, Blue). En línia a l'abril de 2016. Disponible a: <http://pasoapasodg.blogspot.com.es/>

Figura 2.6. Capes de la retina. Disponible a: Assignatura Anatomia de la visió. Tema 11: La Retina. Grau d'òptica i optometria de la UPC (Catalunya) 2015.

Figura 2.7. Estructura dels cons a l'esquerra i bastons a la dreta. Disponible a: Assignatura Anatomia de la visió. Tema 11: La Retina. Grau d'òptica i optometria de la UPC (Catalunya) 2015.

Figura 2.8. Nivells de liposfucina en la fòvea a diferents edats. Michael E. Boulton, George C. Brainard, William Jones, Paul Karpecki, Ron Melton, Randall Thomas "Blue light hazard: New Knowledge, New approaches to Maintaining Ocular health" UV and Blue-Violet Light Definitions, risks and prevention. Pag 43, 2013.

Figura 2.9. Posició del nucli supraquiasmàtic i de la glàndula pineal. En línia a l'abril de 2016. Disponible a: <http://ancientchristianwisdom.com/wp-content/uploads/2014/07/PINEAL.jpg>

Figura 2.10. Producció de melatonina durant el dia i la nit i en diferents estacions. PUEDE LA LUZ AFECTAR A NUESTRA SALUD? RoI MA, Otárola BB, Martínez Nicol.s A, Bonmat. MA, Ortiz-Tudela E, Argüelles R, Martinez-Madrid MJ, Madrid JA. Laboratorio de Cronobiolog.a,

Departamento de Fisiología, Facultad de Biología, IMIB-Arrixaca, Universidad de Murcia.
CATÁLOGO EL LADO OSCURO DE LA LUZ. CONTAMINACIÓN LUMÍNICA.

Figura 2.11 (a) Esquema dels circuits retinals més rellevants per les respostes circadiana, neuroendocrina i neurofuncional. CBC: Cel·lules bipolars dels cons, RBC: Cel·lules bipolars dels bastons, All: Cèl·lules amacrines. (b) Funció de sensibilitat individual de cada una de les diferents cèl·lules fotorreceptives: R (Rode opsin), M (melanopsin), SC (S cone opsin), MC (M cone opsine) i LC (L cone opsine). Cada una d'elles absorbeix la llum d'acord amb el seu propi espectre de sensibilitat.

Figura 2.12. Transmissió electromagnètica en els mitjans oculars. Disponible a: Assignatura Ergonomia de la visió. Tema 8: Efectes de la il·luminació en l'organisme humà. Grau d'òptica i optometria de la UPC (Catalunya) 2015.

Figura 2.13. Estructura del cristal·lí. En línia a l'abril de 2016. Disponible a: <http://www.ofthalmologia-online.es/anatom%C3%ADa-del-globo-ocular/cristalino/>

Figura 2.14. Afecció de la llum blava als fotoreceptors amb pigment macular a la dreta i sense a l'esquerra. En línia a l'abril de 2016. Disponible a: <http://gvofthalmologia.com/164-2/>

Figura 2.15. Mostra d'una làmina Reticare per una tablet. En línia a l'abril de 2016. Disponible a: <http://www.xataka.com/moviles/cientificos-espanoles-desarrollan-reticare-un-protector-de-pantalla-que-cuida-nuestra-vista>

Figura 2.16. Diferència del reflexa de la llum d'una lent amb antireflexant (esquerra) i el Crizal Prevencia (dreta). En línia a l'abril de 2016. Disponible a: <http://betteroptic.com>

Figura 2.17. Pantalles principals de la app d'Android. Imprimir pantalla de la aplicació.

Figura 2.18. Configuració del Night Shift del sistema operatiu IOS. Imprimir pantalla de la aplicació.

Figura 2.19. Aplicació *f.lux* per Windows. Imprimir pantalla de la aplicació.

Figura 4.1. Tableta Acer Inconia One 7. En línia a l'abril de 2016. Disponible a: <http://www.acer.com/ac/es/MX/content/series/iconiaone7>

Figura 4.2. Dispositiu Iphone 5s. En línia a l'abril de 2016. Disponible a:
http://www.vodafone.co.uk/brands/apple/iphone-5s/#Space_Grey/16

Figura 4.3. Ordinador portàtil Asus F555L. En línia a l'abril de 2016. Disponible a:
[http://www.bhphotovideo.com/c/product/1067794
REG/asus_x555la_db71_i7_4510u_2g_8gb_1tb_windows8_1_64_15_6_black.html](http://www.bhphotovideo.com/c/product/1067794_REG/asus_x555la_db71_i7_4510u_2g_8gb_1tb_windows8_1_64_15_6_black.html)

Figura 4.4. Matriu de LEDs. Imatge extreta del microscopi del laboratori.

Figura 4.5. Muntatge de l'espectroradiòmetre i portàtil Asus F555L. Feta la foto amb l'Iphone 6.

Articles

[Augusto 2015] *Carlos Augusto Domínguez-Solís y Jorge Alberto Pérez-León* "Mecanismo de fototraducción de la melanopsina en las células ganglionares retinianas intrínsecamente fotosensibles (ipRGC)" Fototraducción por melanopsina;151:764-76, 2015.

[Alberto 2009] Jorge Alberto Pérez-León y R. Lane Brown "LAS CÉLULAS CON MELANOPSINA: NUEVOS FOTORRECEPTORES EN LA RETINA DE LOS VERTEBRADOS" REB 28(1): 9-18, 2009.

[Barbero 2015] Sergio Barbero, Carlos Dorronsoro y José Gonzalo "La luz: ciencia y tecnología"Capítulo 9. Luz e iluminación. Apartado 9.2 generación de luz., 2015.

[Boulton 2013] Michael E. Boulton, George C. Brainard, William Jones, Paul Karpecki, Ron Melton, Randall Thomas "Blue light hazard: New Knowledge, New approaches to Maintaining Ocular health" UV and Blue-Violet Light Definitions, risks and prevention. 37-83, 2013.

[Brainard 2001]Brainard GC, Hanifin JP, Greeson JM, Byrne B, Glickman G, Gerner E, Rollag MD. Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor. Journal of Neuroscience; 21: 6405–6412, 2001.

[Brainard 2008]Brainard GC, Sliney D, Hanifin JP, Glickman G, Byrne B, Greeson JM, Jasser S, Gerner E, Rollag MD. Sensitivity of the human circadian system to short-wavelength (420-nm) light. Journal of Biological Rhythms; 23: 379–386, 2008.

[Chamorro 2013] Chamorro, E., Bonnin-Arias, C., Perez-Carrasco, M.J., Munoz de Luna, J., Vazquez, D., Sanchez-Ramos, C. "Effects of Light-emitting Diode Radiations on Human Retinal Pigment Epithelial Cells *In Vitro*". *Photochemistry and Photobiology*, vol 89 , 468-473, 2013.

[Gall 2004a] Gall D. Die messung circadianer strahlungsgrößen: Viertes Symposium Licht und Gesundheit, 26–27 February 2004: 2004: 120-138. Berlin: Paul Kistmacher.

[Gall 2004b] Gall D, Bieske K. Definition and measurement of circadian radiometric quantities. In: Light and health – Non-visual effects: Proceedings of the CIE symposium '04, 30 September–2 October 2004, Vienna, Austria: 129–132. Vienna : CIE. 2004.

[Lucas 2014] Lucas RJ, Peirson SN, Berson DM, Brown TM, Cooper HM, Czeisler CA, Figueiro MG, Gamlin PD, Lockley SW, O'Hagan HB, Price LLA, Provencio I, Skene DJ, Brainard GC. Measuring and using light in the melanopsin age. *Trends in Neurosciences*; 37: 1–9, 2014.

[Millan 2003]. Maria Sagrario Millán, Jaume Escofet, Elisabet Pérez. "Óptica Geométrica" Capítulo 1. La naturaleza de la luz. 15 – 18. 2003

[Provencio 1998] Provencio I, Jiang G, De Grip WJ, Hayes WP, Rollag MD. Melanopsin: An opsin in melanophores, brain, and eye. *Proc Natl Acad Sci U S A*; 95: 340-5. 1998.

[Schanda 2010] János Schanda University of Pannonia Virtual Environment and Imaging Technologies Laboratory based on the paper by W. Halbbritter, W Horak "LED photobiology", 2010.

[Thapan 2001] Thapan K, Arendt J, Skene DJ. An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans. *Journal of Physiology*; 535: 261–267, 2001.

Pàgines Web consultades:

Blue Control Hoya [en línea] [consulta: abril 2016] Disponible a: http://m.hoya.eu/bluecontrol_sp.php

Crizal Prevencia [en línea] [consulta: abril 2016] Disponible a:
<http://www.essilor.es/lentesessilor/tratamientos/paginas/crizalprevencia.aspx>

CSR Prats [en línea] 2013 [consulta: abril 2016] Disponible a:
http://certificadocsr.com/index.php?option=com_content&view=article&id=87:noticia1&catid=79&Itemid=541

Daño ocular causado por dispositivos LED [en línea]Cuart trimestre, 2012 [consulta: abril 2016] Disponible a:
<http://www.mapfre.com/fundacion/html/revistas/seguridad/n128/es/articulo3.html>

El ojo humano como receptor de luz (Parte I) [en línea] noviembre 5, 2013 [consulta: abril 2016] Disponible a: <https://teknikailuminacion.wordpress.com/2013/11/05/el-ojo-humano-como-receptor-de-luz-parte-i/>

El Premio Nobel de Física 2014 es otorgado a los creadores del LED azul [en línea] 2004-2015[consulta: abril 2016] Disponible a: <http://noticias.universia.es/ciencia-nt/noticia/2014/10/08/1112839/premio-nobel-fisica-2014-otorgado-creadores-led-azul.html>

Enfermedades de la vista [en línea] [consulta: abril 2016] Disponible a:
<http://salud.doctissimo.es/enfermedades/enfermedades-vista/efectos-luz-azul-vista.html>

Fotorreceptor [en línea] noviembre 2009 [consulta: abril 2016] Disponible a:
<https://es.wikipedia.org/wiki/Fotorreceptor>

Fotorreceptores de la retina: Conos y Bastones -Centro de Oftalmología Bonafonte. Barcelona (España) [en línea] [consulta: abril 2016] Disponible a:
https://www.youtube.com/watch?v=LeFvR-_6kc

Los fotorreceptores, esas fascinantes células [en línea] noviembre 2009 [consulta: abril 2016] Disponible a: <http://www.sebbm.es/web/es/divulgacion/rincon-profesor-ciencias/articulos-divulgacion-cientifica/157-los-fotorreceptores-esas-fascinantes-celulas>

Luz azul: ¿tan ogro como la pintan? [en línea] [consulta: abril 2016] Disponible a:
<http://www.jotdown.es/2014/10/luz-azul-tan-ogro-como-la-pintan/>

Luz azul y ritmo circadiano [en línea] 13 septiembre, 2015 [consulta: abril 2016] Disponible a:
<http://ocularis.es/blog/luz-azul-y-ritmo-circadiano-ii/>

Mácula [en línea] [consulta: abril 2016] Disponible a: <http://gvoftalmologia.com/164-2/>

Osram la historia del LED [en línea] [consulta: abril 2016] Disponible a:
http://www.osram.es/osram_es/noticias-y-conocimiento/led-home/conocimiento-profesional/basicos-led/historia-del-led/index.jsp

Qué es un LED [en línea] 2004-2015[consulta: abril 2016] Disponible a:
http://www.asifunciona.com/fisica/ke_led/ke_led_5.htm

Receptores sensoriales: la visión [en línea] 11 març, 2011[consulta: abril 2016] Disponible a:
<http://fisiologiajmv-hilda.blogspot.com.es/2011/03/sistemas-sensoriales-la-vision.html>

Reticare [en línea] 2013 [consulta: abril 2016] Disponible a:
<http://www.xataka.com/eventos/reticare-mostrara-su-tecnologia-de-proteccion-ocular-en-los-premios-xataka-2013>

